

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

## DIPLOMSKI RAD

Mentor

Prof.dr.sc. Tomislav Zaplatić

Maja Grozdanić

Zagreb, 2009.

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam diplomski rad izradila potpuno samostalno, koristeći se literaturom i znanjem stečenim tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, te uz nadzor komentora dr.sc. Borisa Ljubenkova.

*Maja Grozdanić*

U Zagrebu, 15. siječnja 2009.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se svojem mentoru prof.dr.sc.Tomislavu Zaplatiću što mi je omogućio izradu ovog diplomskog rada i komentoru dr.sc. Borisu Ljubenkovu na stručnoj pomoći pri izradi mog diplomskog rada.

Također se zahvaljujem dipl.ing.Matjažu Žižmondu na korisnim savjetima i nesebičnoj pomoći u proteklm mjesecima.

Zahvaljujem se svim profesorima koji su me podučavali tijekom mog studiranja te svim svojim kolegama i prijateljima koji su vjerovali u mene i bili u mome životu svo ovo vrijeme.

Posebna zahvala mojoj mami Miri koja je bila najveća podrška i imala razumijevanja sve ove godine.

# SADRŽAJ

<b>SADRŽAJ .....</b>	<b>I</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>III</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>IV</b>
<b>POPIS DIJAGRAMA .....</b>	<b>V</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>VI</b>
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 MATERIJAL ZA IZRADU TRUPA PNEUMATIČKE BRODICE.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 POLIMERNI KOMPOZIT - LAMINAT .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 STRUKTURA LAMINATA TRUPA PNEUMATIČKE BRODICE.....</b>	<b>12</b>
2.2.1 Staklena armatura.....	14
2.2.2 Poliesterska smola.....	19
2.2.3 Gelcoat .....	23
2.2.4 Topcoat .....	25
2.2.5 Katalizator.....	25
2.2.6 Odvajač za kalupe .....	27
2.2.7 Ukrepe dna .....	28
<b>3 RUČNO LAMINIRANJE – POSTUPCI I FAZE IZRADE .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 POSTUPAK IZRADE ODLJEVKA RUČNIM LAMINIRANJEM .....</b>	<b>30</b>
3.1.1 Nanošenje sredstva za odvajanje.....	30
3.1.2 Nanošenje gelcoata .....	31
3.1.3 Postupak laminiranja.....	33
3.1.3.1 Odljevak dna.....	35
3.1.3.2 Odljevak palube.....	38
3.1.3.3 Roštilj i ukrepe dna.....	41
3.1.4 Spajanje odljevaka .....	43
<b>3.2 RADIONICA ZA IZRADU TRUPA RUČNIM LAMINIRANJEM.....</b>	<b>45</b>
3.2.1 Opis brodograđevne radionice i tokovi materijala .....	45
3.2.2 Oprema brodograđevne radionice .....	48
<b>3.3 TROŠKOVNIK GRADNJE TRUPA RUČNIM LAMINIRANJEM.....</b>	<b>50</b>
3.3.1 Cijena radnih sati .....	50
3.3.2 Troškovi materijala, opreme i alata.....	53

<b>4</b>	<b>VAKUUMSKA INFUZIJA – POSTUPCI I FAZE IZRADE .....</b>	<b>54</b>
<b>4.1</b>	<b>MATERIJAL I OPREMA ZA PROCES VAKUUMSKE INFUZIJE.....</b>	<b>59</b>
<b>4.2</b>	<b>POSTUPAK IZRADE ODLJEVAKA VAKUUMSKOM INFUZIJOM .....</b>	<b>70</b>
4.2.1	Odljevak dna .....	70
4.2.2	Odljevak palube .....	76
<b>4.3</b>	<b>RADIONICA ZA IZRADU TRUPA VAKUUMSKOM INFUZIJOM.....</b>	<b>84</b>
<b>4.4</b>	<b>TROŠKOVNIK GRADNJE TRUPA VAKUUMSKOM INFUZIJOM.....</b>	<b>85</b>
4.4.1	Cijena radnih sati .....	85
4.4.2	Troškovi materijala i opreme .....	88
<b>5</b>	<b>TEHNOEKONOMSKA ANALIZA .....</b>	<b>90</b>
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>91</b>
	<b>LITERATURA .....</b>	<b>93</b>

## POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Osnovne karakteristike pojedinih vrsta vlakana.....	6
Tablica 2.2 Osnovne karakteristike pojedinih vrsta smola .....	11
Tablica 2.3 Prednosti i nedostaci pojedinih vrsta smola .....	11
Tablica 2.4 Masa staklene armature, smole i laminata za konstruktivne elemente trupa .....	13
Tablica 2.5 Masa staklene armature .....	13
Tablica 2.6 Masa smole.....	13
Tablica 2.7 Sastav E-stakla i S-stakla .....	14
Tablica 2.8 Potrebna količina staklene armature .....	18
Tablica 2.9 Potrebna količina poliesterske smole .....	22
Tablica 2.10 Orijentacijska vremena želiranja gelcoata Viapal 4780 kod 20°C .....	23
Tablica 2.11 Potrebna količina gelcoata .....	24
Tablica 2.12 Potrebna količina topcoata .....	25
Tablica 2.13 Potrebna količina katalizatora .....	26
Tablica 2.14 Potrebna količina odvažača.....	28
Tablica 2.15 Potrebna količina šperploče .....	28
Tablica 3.1 Količine materijala po slojevima laminata dna .....	36
Tablica 3.2 Redosljed laminiranja odljevka dna .....	37
Tablica 3.3 Količine materijala po slojevima laminata palube .....	39
Tablica 3.4 Redosljed laminiranja odljevka palube .....	40
Tablica 3.5 Redosljed laminiranja odljevka roštilja dna .....	41
Tablica 3.6 Broj i cijena radnih sati za izradu trupa brodice ručnim laminiranjem.....	51
Tablica 3.7 Cijena materijala za izradu trupa brodice.....	53
Tablica 4.1 Karakteristike Quadriaxial ojačanja .....	60
Tablica 4.2 Karakteristike Lantor Soric materijala .....	61
Tablica 4.3 Potrebna količina gelcoata .....	70
Tablica 4.4 Količina slojeva laminata za odljevak dna.....	71
Tablica 4.5 Potrebna količina katalizatora za odljevak dna .....	75
Tablica 4.6 Potrebna količina gelcoata .....	76
Tablica 4.7 Količina slojeva laminata za odljevak palube .....	76
Tablica 4.8 Potrebna količina katalizatora za odljevak palube .....	83
Tablica 4.9 Vrijednosti dopuštenih koncentracija stirena .....	84
Tablica 4.10 Broj i cijena radnih sati za izradu trupa brodice vakuumskom infuzijom .....	86
Tablica 4.11 Cijena materijala ojačanja .....	88
Tablica 4.12 Cijena ostalih materijala za vakuumsku infuziju .....	88
Tablica 4.13 Cijena opreme za vakuumsku infuziju .....	89
Tablica 5.1 Usporedba značajki proizvodnje različitim tehnologijama.....	90

## POPIS SLIKA

Slika 1.1 Pneumatička brodica sa krutim dnom .....	1
Slika 1.2 Pneumatička brodica za vojne svrhe .....	2
Slika 1.3 Pneumatička brodica Ragusa 1000 .....	3
Slika 2.1 Različite vrste tkanja rovinga .....	15
Slika 2.2 Hasura (roving) .....	15
Slika 2.3 Pust (mat) .....	17
Slika 3.1 Nanošenje zaštitno - dekorativnog sloja .....	31
Slika 3.2 Odljevak dna .....	35
Slika 3.3 Odljevak palube .....	38
Slika 3.4 Izrada roštilja dna .....	41
Slika 3.5 Postavljanje i učvršćivanje roštilja dna .....	42
Slika 3.6 Polaganje odljevka palube na odljevak dna .....	43
Slika 3.7 Spajanje odljevaka palube i dna .....	43
Slika 3.8 Laminiranje unutarnjeg spoja palube i dna .....	44
Slika 3.9 Shema radionice sa tokovima proizvoda .....	46
Slika 3.10 Shema radionice sa tokovima materijala .....	47
Slika 4.1 Prikaz procesa vakuumske infuzije .....	56
Slika 4.2 Smjerovi tkanja Quadriaxial ojačanja .....	59
Slika 4.3 EnkaFusion Nylon hasura .....	60
Slika 4.4 Lantor Soric materijal .....	60
Slika 4.5 Divinymat Sandwich Core .....	61
Slika 4.6 Položaj Filter Jacket-a .....	62
Slika 4.7 Postavljanje T-spojnica za cjevovod smole .....	63
Slika 4.8 Postavljanje spiralnih cjevovoda vakuuma .....	64
Slika 4.9 Shematski prikaz slojeva vakuumskog omota .....	65
Slika 4.10 Peelply .....	65
Slika 4.11 Mreža .....	66
Slika 4.12 Priključivanje cjevovoda vakuuma i smole .....	67
Slika 4.13 Postavljanje mreže .....	71
Slika 4.14 Postavljanje cjevovoda smole .....	72
Slika 4.15 Spoj cjevovoda smole .....	72
Slika 4.16 Uvođenje smole u laminat .....	73
Slika 4.17 Postavljanje prvog sloja laminata na kalup palube .....	77
Slika 4.18 Polaganje SoricXF3 ojačanja na mjesta većih opterećenja .....	77
Slika 4.19 Postavljanje završnog sloja laminata palube .....	78
Slika 4.20 Najviši krug cjevovoda smole .....	78
Slika 4.21 Krug cjevovoda smole na krmenom dijelu palube .....	79
Slika 4.22 Postavljanje vakuumske vreće .....	80
Slika 4.23 Postavljanje vakuumskih cjevovoda .....	80
Slika 4.24 Spajanje vakuumskih cjevovoda na pumpu i separator .....	81
Slika 4.25 Detektor propusnosti vakuuma .....	89
Slika 4.26 Vakuumska pumpa i separator .....	89

## POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 2.1 Odnos naprezanja i deformacije različitih vrsta vlakana .....	7
Dijagram 2.2 Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti različitih vrsta smola .....	9
Dijagram 2.3 Tipična krivulja odnosa naprezanja i deformacije za kompozitni materijal .....	9
Dijagram 2.4 Usporedba deformacija različitih vrsta smola.....	10
Dijagram 2.5 Ovisnost mase staklene armature u laminatu debljine 1 mm o postotku staklene armature.....	12
Dijagram 2.6 Ovisnost temperature i vremena želiranja smole .....	20
Dijagram 2.7 Ovisnost temperature i vremenskog razdoblja otvrdnjavanja.....	20
Dijagram 2.8 Krivulje naprezanje-istezanje za vlačno i tlačno opterećenje poliesterske smole .....	21
Dijagram 2.9 Odnos vremena želiranja katalizatora i temperature okoline .....	25



## SAŽETAK

U diplomskom radu obrađena je tehnologija izrade trupa pneumatičke brodice sa krutim dnom na osnovu projektne i radioničke tehničke dokumentacije brodice duljine 10 m. Izrada brodice u radu je prikazana metodom klasičnog ručnog laminiranja i naprednom tehnologijom vakuumske infuzije. Dan je detaljan opis i karakteristike materijala koje je moguće koristiti, i koji su korišteni, za izradu trupa iz stakloplastike. Uz opis materijala, definirani su i njihovi troškovi, kao i sva potrebna oprema u radionici. U konačnici, napravljena je tehnoeekonomska analiza i usporedba opisanih tehnoloških procesa, sa svim njihovim prednostima i nedostacima.

# 1 UVOD

U današnje vrijeme sve više se razvija potreba za brodicama koje se koriste u sportsko-turističke i rekreativne svrhe. U te, i razne druge profesionalne svrhe pogodnim su se našli gumeni čamci, tj. pneumatičke brodice sa krutim dnom. Čamci s pneumatskim elementima, danas su u trendu. Nautičari su prepoznali njihove prednosti, poput izvanrednog ponašanja na moru, velike nosivosti, praktične nepotopivosti.



**Slika 1.1 Pneumatička brodica sa krutim dnom**

Za razliku od svih ostalih tipova brodica, pneumatičke brodice se mogu prilagoditi najrazličitijim situacijama, pa tako mogu služiti jednostavnom prijevozu putnika, kao pomoćna plovila (tenderi), sportski čamci i čamci za spašavanje na većim brodovima, ili s obzirom na to da su vrlo stabilni čak i za većih valova, mogu poslužiti i kao spasilačka plovila za pomoć nastradalima te se koriste u vojne svrhe.



Slika 1.2 Pneumatička brodica za vojne svrhe

Pneumatičke brodice s krutim dnom (engl. *RIB*, *Rigid Inflatable Boat*) današnjice imaju dno gotovo jednako onima brodica od krutih materijala, ali zbog specifičnih odnosa između duljine čamca, snage motora i težine, njihove se performanse uvelike razlikuju.

Jedan od takvih brodova je i **Ragusa 1000**. Sa svojom duljinom preko svega  $Loa = 10$  m i širinim  $B = 3,25$  m trenutno predstavlja najveće hrvatsko plovilo ove vrste. Ova pneumatička brodica sa dnom iz stakloplastike izrađuje se u više varijanti; kao radna verzija za prijevoz putnika sa 16 joker-sjedalica, kao ekskluzivnija verzija za prijevoz putnika sa 8 do 12 hidrauličnih sjedalica koje su okretne u svim smjerovima, kao obiteljska verzija sa velikim sunčalištem, tušem, kuhinjom, kvalitetnim ozvučenjem i krmenim, luksuznim separeom te kao univerzalni gumenjak koji može služiti ili za prijevoz ronioca, kupaca, za ribolov ili jednostavno samo za brzu i udobnu rekreativnu vožnju.



**Slika 1.3 Pneumatička brodica Ragusa 1000**

Brodica se trenutno izrađuje postupkom ručnog laminiranja. Zbog interesa za masovniju proizvodnju te sa ciljem poboljšanja tehnoloških karakteristika brodice, razmatraju se nove tehnologije proizvodnje. Upotrebom novih tehnologija, kao vakuumska infuzija, znatno bi se poboljšao proizvod sa stanovišta kvalitete jer bi time bio dobiven brod manje težine, ali još veće čvrstoće. Novim tehnologijama, pa tako i vakuumskoj infuziji, cilj je i skraćivanje vremena proizvodnje brodice, čime je omogućena željena masovnija proizvodnja. Tehnologija vakuumske infuzije također bi zadovoljila visoke ekološke standarde u današnjim proizvodnim procesima.

## 2 MATERIJAL ZA IZRADU TRUPA PNEUMATIČKE BRODICE

Polimerni kompoziti, zbog niza dobrih svojstava, kao što su mehaničke karakteristike, korozijska otpornost, niska gustoća, mogućnost izrade dijelova složenih oblika, jednostavnost izrade; povoljnog odnosa cijena/svojstva, sa primjenom drugih usmjerenih vlakana i uvođenjem novih postupaka izrade (injekcijsko prešanje ploča i složenih oblika, strojno namotavanje cijevi i sfernih oblika, pultruzija-vučenje sirovog materijala kroz dizu odgovarajućeg oblika), našli su široku primjenu u brodogradnji. Zastupljenost kompozita u brodogradnji u svijetu je na 4. mjestu, iza građevinarstva, transporta i elektro-industrije. Kod nas je zastupljenost kompozita pri samom dnu ljestvice.

Materijal za izradu trupa pneumatičke brodice je laminat koji uključuje: staklenu armaturu, poliestersku smolu, gelcoat, topcoat, katalizatore i odjeljivač te vodonepropusnu šperploču. U ovom poglavlju specificirat će se ukupna količina materijala za izradu trupa pneumatičke brodice duljine 10 m te će biti opisana njihova svojstva.

U poglavlju 2.2 za svaki dio brodice biti će izračunata potrebna količina materijala.

### 2.1 POLIMERNI KOMPOZIT - LAMINAT

Laminat je materijal koji se dobiva spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem postizanja potrebne neuobičajene kombinacije svojstava (čvrstoće, gustoće, krutosti, tvrdoće...). Takav kompozitni materijal može zamijeniti najčešće korištene metale, pri čemu se postižu bolje performanse dobivenog proizvoda.

Kompozitni materijali se sastoje od dva osnovna konstituenta: ojačanja (vlakna) i matrice (smole) koji čine slojeve koji su međusobno povezani i tako čine višeslojni kompozit (laminat). Svojstva kompozita određena su svojstvima osnovnih komponenata, njihovim sadržajem, vrstom i orijentacijom ojačanja te kvalitetom veze vlakno-matrica.[1]

Glavne karakteristike kompozita su:

- mala gustoća
- visoka čvrstoća
- visoka specifična čvrstoća
- visoka specifična krutost
- konstrukcijska prilagodljivost
- mogućnost orijentiranosti vlakana
- velika mogućnost kombinacije smola/vlakno
- dobra otpornost na abraziju
- visoka otpornost na koroziju
- dimenzijska stabilnost
- odlične prigušne karakteristike
- mala sposobnost prenošenja buke
- trajnost
- mali utrošak potrebne energije za proizvodnju

**Vlakna** su osnovni nosivi element kompozita i daju mu čvrstoću.

Osnovni zadaci vlakana su :

- Prihvatanje opterećenja – kod konstrukcijskih kompozita vlakna nose 70 – 90 % opterećenja
- Osiguranje čvrstoće, krutosti i toplinske stabilnosti
- Osiguranje električne vodljivosti ili izolacije, ovisno o namjeni kompozita

Općenito vlakna mogu biti:

- Prirodna vlakna (pamuk, sisal, lan, itd.)
- Staklena vlakna (E-staklo, S-staklo, R-staklo)
- Poliesterska vlakna (Dacron, Terilen, itd.)
- Aramidna vlakna (Kevlar, Twaron, itd.)
- Ugljična vlakna (Carbon)
- Metalna vlakna (žica ili žičano pletivo)

**Tablica 2.1 Osnovne karakteristike pojedinih vrsta vlakana**

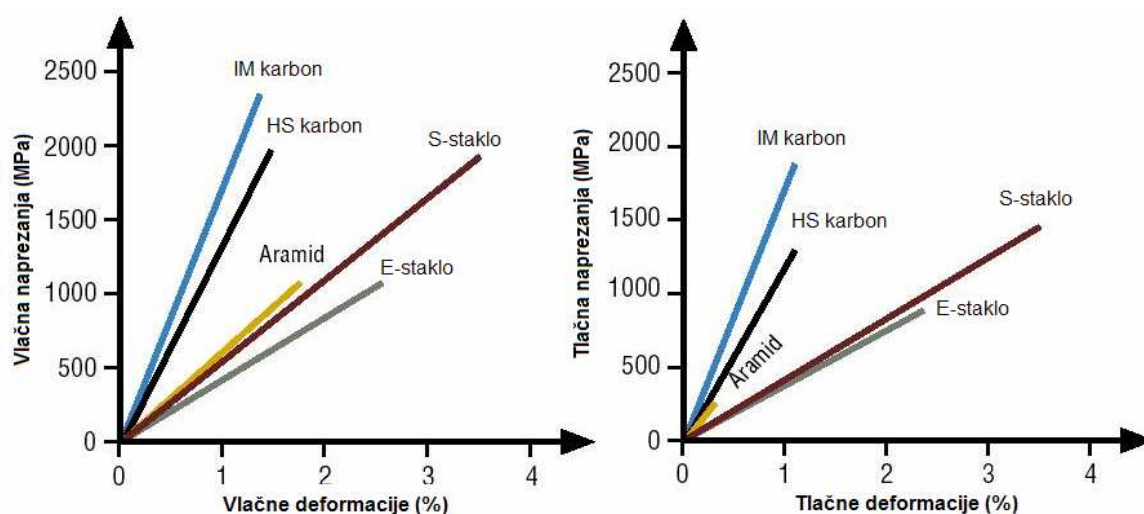
TIP VLAKNA	Gustoća	Promjer	Vlačna čvrstoća	Modul vlaka	Prekidno istezanje	Specif. vlačna čvrstoća	Specif. vlačni modul
	[kg/m <sup>3</sup> 10 <sup>3</sup> ]	[mm]	[GPA]	[GPA]	[%]	[GPA]	[GPA]
Poliester	1,38		1	11	14,5	0,72	8
E-staklo	2,54	8,0-14,0	3,4	72	1,8-3,2	1,34	2,8
S-staklo	2,49	8,0-14,0	4	86	4-4,5	1,57	34
Kevlar 49	1,45	11,9	3,6	130	2,2-2,9	2,48	90
Kevlar 29	1,44	12,1	2,9	69	4,4	2,02	49
Ugljično visoke čvrstoće (HS)	1,74	7,6-8,6	3,1	277	1	1,77	130
Ugljično visokog modula (HM)	1,81	7,0-9,7	2,1	390	0,5	1,16	215

Danas su najrasprostranjenija staklena i ugljična (karbonska) vlakna. Staklena vlakna su najviše upotrebljavana ojačala za plastomerne i duromerne kompozite. Glavne prednosti upotrebe staklenih ojačanja su: visok omjer čvrstoća/težina, dimenzijska stabilnost, postojanost na povišenoj temperaturi i koroziju, dobra električna svojstva, te relativno jednostavna proizvodnja, a s tim u vezi i niska cijena. Stakleni filament dobiva se raznim tehnološkim postupcima iz staklene taline, zatim se nanosi apretura koja štiti vlakna od oštećenja i omogućuje vezu između površine vlakana i različitih smola.

Većina ugljičnih vlakana napravljena su iz poliakrilonitril (PAN) vlakana ili iz različitih smola procesom karbonizacije. Prema osnovnim mehaničkim karakteristikama, ugljična se vlakna klasificiraju kao HS (High Strength – visoke čvrstoće), IM (Intermediate Modulus – umjerenog modula elastičnosti), HM (High Modulus – visokog modula elastičnosti) i UHM (Ultra High Modulus – vrlo visokog modula elastičnosti) vlakna. Promjer vlakana je obično 5-7µm. Ugljična vlakna imaju najveću specifičnu vlačnu i tlačnu čvrstoću te krutost među komercijalnim vlaknima. Imaju veliku otpornost na koroziju, puzanje i zamor. Žilavost ovih

vlakana je manja od žilavosti aramidnih i staklenih vlakana, a posebno su krhka HM i UHM vlakna.

U tablici 2.1 [1] dane su vrijednosti nekih mehaničkih svojstava pojedinih vrsta vlakana, a dijagramom 2.1 [2] prikazana je otpornost materijala, i kompozita na njihovoj bazi, na deformaciju s obzirom na vrstu opterećenja. Nagib svake krivulje predstavlja krutost pojedinog materijala. Što je krivulja strmija to je veća i njezina krutost. Može se vidjeti i da se skoro svi materijali, osim armida, ponašaju jednako pri tlačnim i vlačnim opterećenjima.



Dijagram 2.1 Odnos naprezanja i deformacije različitih vrsta vlakana

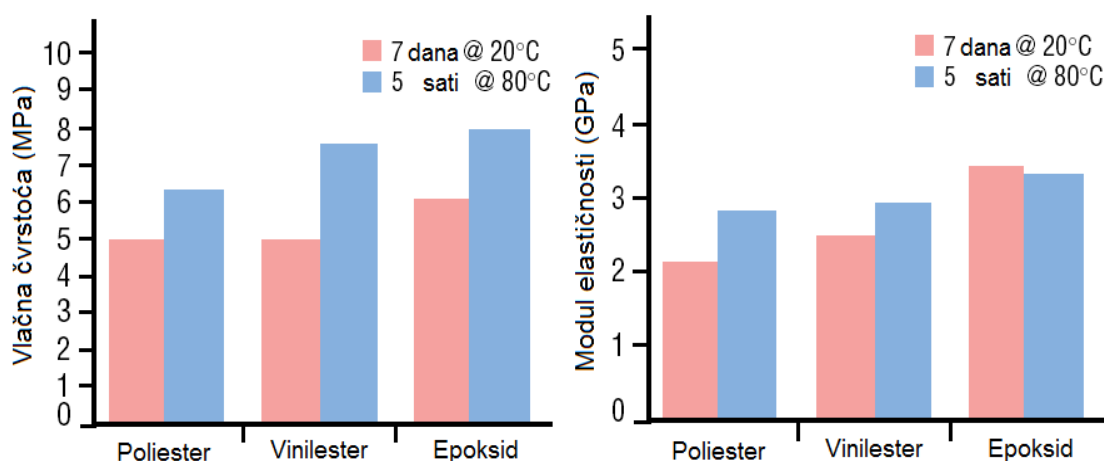


**Matrice** mogu biti polimerne, kako duromeri tako i plastomeri, ugljične, metalne, keramičke i druge. Materijal matrice mora ispuniti više funkcija, od kojih su neke ključne za postizanje zadovoljavajućih performansi sustava:

- Objedinjava vlakna i na njih prenosi opterećenje, te osigurava oblik i krutost konstrukcije
- Izolira pojedinačna vlakna koja se ne mogu samostalno opterećivati, te se na taj način usporava širenje pukotine
- Osigurava dobru kvalitetu površine, te na taj način potiče proizvodnju dijelova u konačnom obliku ili blisko konačnom obliku
- Osigurava zaštitu ojačavajućih vlakana od kemijskih utjecaja i mehaničkih oštećivanja
- Svojom duktilnošću polimerna matrica (plastomeri) povećava žilavost kompozita
- Svojim svojstvima i kompatibilnošću s vlaknim u velikoj mjeri utječe na vid oštećenja

Najčešće se kao duromerna matrica upotrebljavaju nezasićene poliesterske smole u kombinaciji sa staklenim vlaknima i epoksi smole s ugljičnim i organskim (Kevlar) vlaknima. Epoksi smole imaju veću čvrstoću i modul elastičnosti, te niže stezanje pri otvrdnjavanju i niži koeficijent toplinskog širenja. Čvrstoća veze između matrice i vlakana također je veća za epoksi smole. Međutim, njihov je nedostatak viša viskoznost u tekućem stanju i znatno su skuplje. Jedna od karakteristika duromernih smola je krtost. [3]

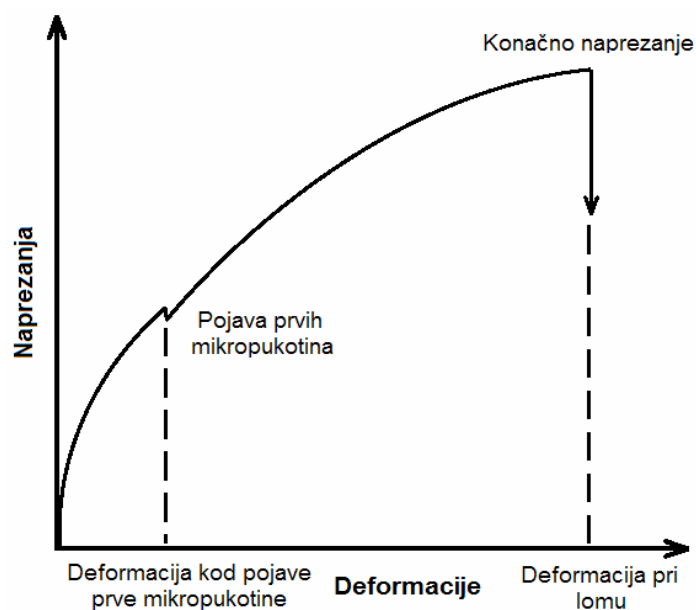
Dva važna mehanička svojstva smole su vlačna čvrstoća i krutost. Dijagram 2.2 [2] pokazuje kako epoksidne smole imaju najbolja mehanička svojstva. Iz dijagrama se može vidjeti i da dodatna polimerizacija na 80 °C djeluje na sve smole u smislu povećavanja vlačne čvrstoće i modula elastičnosti, osim na epoksidne smole, gdje se dodatnom polimerizacijom modul elastičnosti smanjuje.



Dijagram 2.2 Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti različitih vrsta smola

Što se tiče lomova kompozitnih materijala može se vidjeti da će prije potpunog sloma kompozitnog materijala naprezanje postići razinu kod koje dolazi do pojave sitnih pukotina smole koje se šire duž vlakana koja nisu u ravnini sa opterećenjem. To su takozvane poprečne mikropukotine i njihovom pojavom započinje proces pucanja.

Kompozitni materijali trebaju biti tako projektirani da naprezanja u njima nikada ne prelaze naprezanja kod kojih se javljaju mikropukotine. Dijagram 2.3 [2] prikazuje da su deformacije kod kojih se javljaju mikropukotine puno manje od deformacija pri lomu.

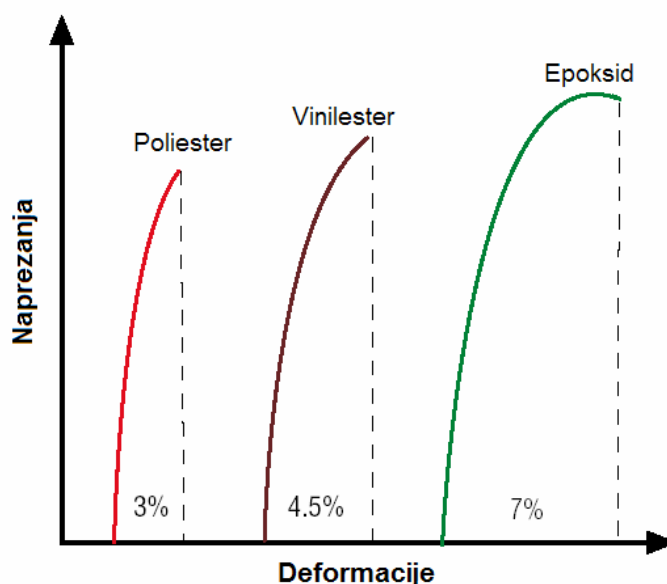


Dijagram 2.3 Tipična krivulja odnosa naprezanja i deformacije za kompozitni materijal

Budući da granična čvrstoća kompozita ovisi o graničnoj čvrstoći vlakana, ove mikropukotine ne smanjuju odmah granična svojstva materijala. Pa ipak u medijima kao što su voda i more laminat s mikropukotinama apsorbirat će puno više vode od neoštećenog laminata. To dovodi do povećanja težine konstrukcije, hidrolize smole, gubitka krutosti i konačno do pada graničnih svojstava.

Mikropukotine se sprječavaju povećanjem adhezije između vlakana i smole. To se postiže odgovarajućim kemijskim sastavom smole i njenom kompatibilnošću s površinskim kemijskim premazima vlakana. Odlična adhezivna svojstva epoksidnih smola omogućuju im da postignu veće deformacije do pojave prvih mikropukotina.

Dijagramom 2.4 [2] prikazan je odnos naprezanja i deformacije do loma za sve tri vrste smola.



Dijagram 2.4 Usporedba deformacija različitih vrsta smola

Tablica 2.2 Osnovne karakteristike pojedinih vrsta smola

SVOJSTVO		EPOKSI SMOLA	POLIESTERSKA SMOLA
Gustoća	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,1-1,4	1,2-1,5
Poissonov koeficijent	-	0,38-0,4	0,37-0,39
Vlačna čvrstoća	[MN/m <sup>2</sup> ]	35-100	40-90
Modul vlaka	[GN/m <sup>2</sup> ]	2,0-6,0	2,5-3,5
Savojna čvrstoća	[MN/m <sup>2</sup> ]	–	80-140
Savojni modul	[GN/m <sup>2</sup> ]	–	3,5-4,0
Tlačna čvrstoća	[MN/m <sup>2</sup> ]	100-200	90-250
Prekidno istezanje	[%]	1,0-6,0	2
Toplinska provodnost	[W/m°C]	0,1	0,2
Koef. toplinskog širenja	[10 <sup>-6</sup> /°C]	60	100-200
Temperatura razaranja	[°C]	50-300	50-110
Stezanje pri otvrdnjavanju	[%]	1,0-2,0	1,0-8,0
Upijanje vode, 24 h na 20 °C	[%]	0,1-0,4	0,1-0,3

Tablica 2.3 Prednosti i nedostaci pojedinih vrsta smola

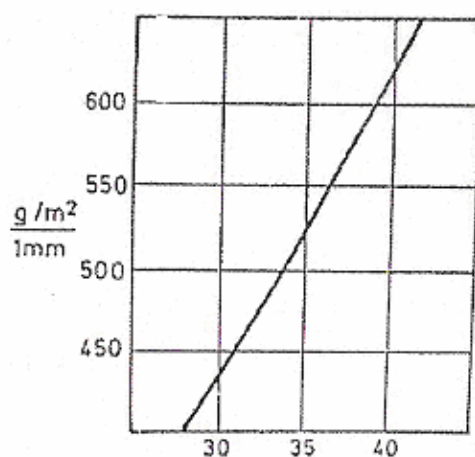
Vrsta smole	Poliester	Vinil ester	Epoksi
Prednosti	Lako se primjenjuje	Vrlo visoka kemijska otpornost (u odnosu na okoliš)	Visoke mehaničke osobine
			Visoka vodootpornost
	Najjeftinija od svih smola	Bolje mehaničke osobine od polyestera	Mogućnost dugog vremena rada
	(1.5 – 3 €/kg)		Otpornost na visoke temperature do 140°C mokro / 220°C suho
Nedostaci	Osrednje mehaničke osobine	Za postizanje boljih svojstava potreban je naknadni tretman	Skuplje od vinylestera
	Visoka emisija stirena kod otvorenih kalupa	Visoki sadržak stirena	(5 – 24 €/kg)
	Veliko utezanje pri otvrdnjavanju	Skuplje od polyestera	Agresivnost kod rukovanja
	Ograničeni raspon vremena rada	(3 – 6 €/kg)	Osjetljiv na nepotpuno miješanje komponenata
		Veliko utezanje pri otvrdnjavanju	

## 2.2 STRUKTURA LAMINATA TRUPA PNEUMATIČKE BRODICE

Laminat za izradu trupa ovog tipa brodice sastoji se od staklene armature i poliesterske smole u omjeru 35 % stakla i 65 % smole. Od staklenih armatura koristit će se dvije vrste armature: pust (mat) i hasura (roving) u više slojeva raznih debljina, tj. masa.

Masa staklene armature označava se kao masa po površini ( $\text{g/m}^2$ ).

Prema Hrvatskom registru brodova 1 mm laminata za omjer 35:65, sadržava  $520 \text{ g/m}^2$  staklene armature.



Dijagram 2.5 Ovisnost mase staklene armature u laminatu debljine 1 mm o postotku staklene armature

Iz podatka o masi staklene armature po 1 mm debljine laminata može se izračunati ukupna specifična masa laminata debljine 1 mm:

$$m_{\text{stakla}} = 520 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{ mm}} \quad - \text{specifična masa staklene armature}$$

$$\frac{m_{\text{smole}}}{m_{\text{stakla}}} = \frac{65}{35} = 1,857$$

$$m_{\text{smole}} = 1,875 \cdot m_{\text{stakla}}$$

$$m_{\text{smole}} = 965,64 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{ mm}} \quad - \text{specifična masa smole}$$

$$m_{\text{laminata}} = m_{\text{stakla}} + m_{\text{smole}}$$

$$m_{\text{laminata}} = 1485,64 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{ mm}} \quad - \text{specifična masa laminata}$$

Dobivenom vrijednošću izračunava se masa staklene armature i masa smole za izradu trupa pneumatičke brodice.

**Tablica 2.4 Masa staklene armature, smole i laminata za konstruktivne elemente trupa**

Element	Debljina laminata	Masa stakla	Masa smole	Masa laminata
	[mm]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]
DNO	6,6	3432	6373	9805
PALUBA	4,5	2340	4345	6685
ROŠTILJ DNA	3,3	1716	3187	4903
KRMENO ZRCALO	4,2	2184	4056	6240
PREGRADE	1,4	728	1352	2080

Struktura laminata mora zadovoljavati minimalne uvjete čvrstoće propisane registrom.

Postizanje zahtjevanе čvrstoće dobiva se strukturom laminata s više slojeva mata 300 g/m<sup>2</sup>, mata 450 g/m<sup>2</sup> i rovinga 600 g/m<sup>2</sup>.

**Tablica 2.5 Masa staklene armature**

Element	Debljina laminata	Masa stakla	SLOJ 1		SLOJ 2			SLOJ 3			Masa stakla
			M	M	M	R	M	M	R	M	
	[mm]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]		[g/m <sup>2</sup> ]			[g/m <sup>2</sup> ]			[g/m <sup>2</sup> ]
DNO	6,6	3432	300	450	300	600	300	450	600	450	3450
PALUBA	4,5	2340	300	450	300	600	300	450			2400
ROŠTILJ DNA	3,3	1716	300	300	300	600	300				1800
KRMENO ZRCALO	4,2	2184	300	450	450	600	450				2250
PREGRADE	1,4	728	300	450							750

**Tablica 2.6 Masa smole**

Element	Debljina laminata	Masa smole	SLOJ 1		SLOJ 2			SLOJ 3			Masa smole
			M	M	M	R	M	M	R	M	
	[mm]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]		[g/m <sup>2</sup> ]			[g/m <sup>2</sup> ]			[g/m <sup>2</sup> ]
DNO	6,6	6373	557	836	557	1114	557	836	1114	836	6407
PALUBA	4,5	4345	557	836	557	1114	557	836			4457
ROŠTILJ DNA	3,3	3187	557	557	557	1114	557				3343
KRMENO ZRCALO	4,2	4056	557	836	836	1114	836				4178
PREGRADE	1,4	1352	557	836							1393

### 2.2.1 Staklena armatura

Staklena armatura je ojačanje laminata u obliku staklenih vlakana koja mogu biti isjeckana na male komade pa sljepljena ili kontinuirana i pravilno isprepletena. Staklena vlakna čine preko 90 % vlakana koja se koriste u laminatima jer su jeftina za proizvodnju i imaju relativno dobar omjer čvrstoće naspram težine, te pokazuju dobru kemijsku otpornost i obradljivost. Staklena vlakna formiraju se ekstruzijom rastopljenog stakla na niti promjera između 4 i 14 mikrona, ponekad i do 20 mikrona. Svaka nit presvlači se slojem ljepila kako bi se smanjilo djelovanje abrazije, a potom se spajaju u snop od 102 ili 204 niti i tvore vlakno. [3]

U brodograđevnim laminatima koriste se dvije vrste staklene armature: S-staklo i E-staklo. E-staklo je najčešće upotrebljavano staklo. Ima nisku elastičnu provodnost, dobru čvrstoću i krutost. S-staklo ima veći modul elastičnosti, višu temperaturnu postojanost, ali i izuzetno visoku cijenu.

**Tablica 2.7 Sastav E-stakla i S-stakla**

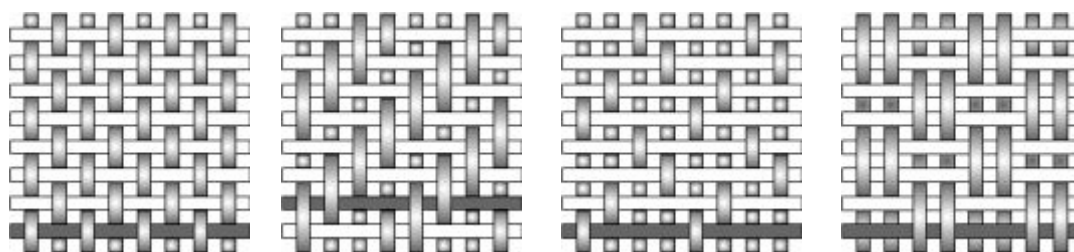
SASTAV	E-staklo (%)	S-staklo (%)
Silikon dioksid	52-56	64-66
Kalcij oksid	16-25	0-0,3
Aluminij oksid	12-16	24-26
Bor oksid	5-10	-
Sodium i potassium oksid	0-2	0-0,3
Magnezij oksid	0-5	9-11
Željezni oksid	0,05-0,4	0-0,03
Titan oksid	0-0,8	-
Flouridi	0-1	-

Za izradu trupa ove brodice koristit će se E-staklo jer ima zadovoljavajuća svojstva čvrstoće i otpornosti na vodu, te je znatno jeftinije od S-stakla koje ima bolju rasteznu čvrstoću i bolji otpor prema zamoru materijala.

Staklena vlakna mogu se tkati na različite načine te se tako dobivaju različite vrste staklene armature, kao što su: pređa, hasura, pletena pređa, pust, isjeckane niti i tkanine.

*Pređa* se izrađuje iz neprekinutih tankih niti koje se povezuju u deblje niti koje imaju izgled slabo odmotanog konopa. Pređa se koristi za tkanje vrlo grubih proizvoda i za izradu pusta.

**Hasura (roving)** je četvrtasto tkani materijal u dva međusobno okomita smjera. Osnova i potka su od guste pređe širine 3 do 6 mm. Niti osnove i potke su isprepletene međusobno na način da svaka nit potke ide naizmjenično ispod i iznad niti osnove. Niti koje čine osnovu nešto su deblje od niti potke te mogu biti isprepletene na različite načine kao što prikazuje slika 2.1. [2]



Slika 2.1 Različite vrste tkanja rovinga



Slika 2.2 Hasura (roving)

Prednosti armature od hasure:

- Lako oblaganje kalupa i lako rukovanje kod ručnog kontaktnog postupka
- Dobivanje debljeg sloja laminata nego kod tkanine
- Dobiva se veći sadržaj stakala u sloju kod ručnog kontaktnog postupka
- Zbog guste pređe ima odličan otpor na udar



Nedostaci armature od hasure:

- Fine, dovoljno kompaktne staklene niti pređe u hasuri su poteškoća za odstranjenje vlage kao i za impregniranje uz pomoć smole. Zbog toga se može stvoriti slaba veza među nitima unitar pojedinih snopova pređe.
- Grubo tkanje hasure može zadržati mjehuriće zraka i stvoriti šupljine koje prouzrokuju porozne laminate koji omogućuju prodiranje vode. Ova pojava naročito se primjećuje kod tanjih laminata.
- Grubo tkanje može prouzrokovati nagomilavanje među pojedinim snopovima, a i slojevima prevelike količine smole. Velike količine smole izvrgnute su pucanju, drobljenu, maloj čvrstoći na smik i slaboj međulaminarnoj vezi.
- Velika usmjerena svojstva hasure su, na osnovu nekih istraživanja, nedostatak. Glavni pravci ojačanja kod hasure su u pravcu potke i osnove. Čvrstoća između tih pravaca je znatno smanjena.

Hasura se isporučuje u rolama standardne širine od 1 m ili 1,25 m, a duljine od 50 do 250 m.

Klasificira se po masi po metru kvadratnom.

Najčešće upotrebljavana hasura je mase  $600 \text{ g/m}^2$ .

*Pletena pređa* je tip staklene armature izrađen pletenjem pređe i nalikuje hasuri, ali su ovakve armature rijede građe. Ovakva armatura lakše se oslobađa vlage, poboljšana je čvrstoća na smik među slojevima. Ovaj tip armature po jedinici mase laminata omogućuje veći sadržaj stakla nego ekvivalentnih masa kod laminata iz pusta, a nešto manji sadržaj nego kod laminata iz hasure.

**Pust (mat)** je staklena armatura koja se sastoji isjeckanih, nasumce razbacanih staklenih vlakana, koja su međusobno sljepljena smolom koja se po svojim karakteristikama podudara sa smolom koja se upotrebljava za izradu laminata. Jedna od smola koja se koristi za vezivanje vlakana u pustu je visokotopljiva poliesterska smola.

Pust se izrađuje u različitim debljinama, a masa se kreće od 230 do  $920 \text{ g/m}^2$ . Pust se također kupuje u rolama standardne širine 1 ili 1,25 m i duljine 50 do 250 m, a najčešće se upotrebljava onaj mase 300, 450 i  $600 \text{ g/m}^2$ .

U usporedbi s ostalim tipovima armature pust je najjeftiniji.



**Slika 2.3 Pust (mat)**

Prednosti pusta su:

- Niska cijena po kvadratnom metru i debljinama
- Jednaka mehanička svojstva u svim pravcima
- Dobra međulaminarna veza zbog međusobno dobrog povezivanja niti susjednih slojeva
- Primjenjiv kod fomiranja kompliciranih oblika

Nedostaci pusta su:

- Debljina laminata kod kontaktnog postupka ne može se sigurno kontrolirati
- Kod kontaktnog postupka zbog pomicanja niti za vrijeme nanošenja smole, sadržaj stakla je neravnomjerno raspoređen, a kontrola nije lagana
- Kod poliesterskih laminata za vrijeme sušenja smole uslijed polimerizacije dolazi do stezanja pa krajnji sloj nije gladak nego se ocrtavaju vlakna
- Kod kontaktnog postupka laminati imaju manje stakla nego laminati od tkanine i hasure, što rezultira u manjem modulu elastičnosti za jednake debljine. Ovaj nedostatak može se izbjeći većim debljinama presjeka.

**Potrebna količina staklene armature**

Potrebna količina staklene armature dobije se iz poznate ukupne površina pojedinih elemenata trupa brodice i njihovih debljina. Na tu površinu, tj. masu dodaje se rezerva od 10 % zbog završetaka slojeva te se iz podataka o strukturi laminata izračuna količina svih vrsta staklene armature.

**Tablica 2.8 Potrebna količina staklene armature**

Element	Debljina laminata	Masa stakla	Površina	Masa	Dodatak 10 %		Mat M 300			Mat M 450			Roving M 600		
					Površina	Masa	Broj slojeva	[m <sup>2</sup> ]	[kg]	Broj slojeva	[m <sup>2</sup> ]	[kg]	Broj slojeva	[m <sup>2</sup> ]	[kg]
	[mm]	[g/m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]									
DNO	6,6	3450	19,95	68,83	2,00	6,88	3	65,84	19,75	3	65,84	29,63	2	43,89	26,33
PALUBA	4,5	2400	20,05	48,12	2,01	4,81	3	66,17	19,85	2	44,11	19,85	1	22,06	13,23
ROŠTILJ DNA	3,3	1800	8,15	14,67	0,82	1,47	4	35,86	10,76				1	8,97	5,38
KRMENO ZRČALO	4,2	2550	2,75	7,01	0,28	0,70	1	3,03	0,91	3	9,08	4,08	1	3,03	1,82
PREGRADE	1,4	1500	1,80	2,70	0,18	0,27	1	1,98	0,59	1	1,98	0,89			
								172,87	51,86		121,00	54,45		77,94	46,76
Σ =								57,97	155,46						

### 2.2.2 Poliesterska smola

Poliesterske smole se najčešće koriste u proizvodnji kompozita zbog svoje jednostavnosti, niskih proizvodnih temperatura, niske viskoznosti pri proizvodnji, dobrog oplakivanja vlakana te relativno niske cijene. Poliesterske smole spadaju u duromere koji pri zagrijavanju, ne mijenjaju stanje, već ostaju krute i ne omekšavaju. Proizvode se egzotermnim kemijskim reakcijama - polimerizacija, pri kojim se nezasićeni poliesteri mješaju sa relativno malom količinom katalizatora. Pri sobnoj temperaturi vrlo brzo polimeriziraju (približno 25 minuta pri temperaturi od 20°C). Vrijeme u kojem smola prelazi iz tekućeg u kruto stanje, tj. postiže minimalnu potrebnu tvrdoću naziva se vrijeme želiranja. Pri polimerizaciji dolazi do oslobađanja topline i isparavanja otapala (stirena). Poželjno je koristiti smole sa što manjom emisijom stirena zbog štetnog utjecaja na okoliš i zdravlje radnika. Brzina i količina oslobađanja topline ovise o debljini laminata, brzini otvrdnjavanja te apsorpciji topline u okolni zrak.

Postoje dvije osnovne skupine poliesterskih smola koje se koriste pri izradi trupa brodice, a to su ortotalične i isotalične smole. Orto-smole su prvobitna skupina poliestera, imaju nešto ograničeniju toplinsku stabilnost, kemijsku otpornost i obradbene karakteristike.

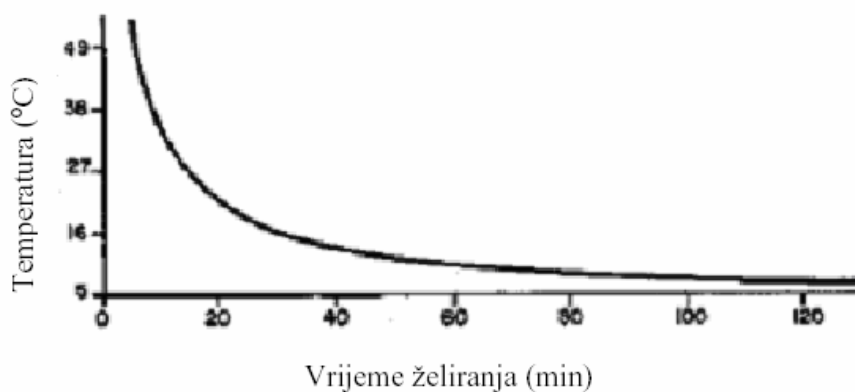
Iso-smole imaju bolja mehanička svojstva i bolju kemijsku otpornost. Imaju također dobro svojstvo vodootpornosti te se koriste kao zaštitno-dekorativni slojevi (gelcoat-i). [3]

Odabrana smola za izradu trupa ručnim laminiranjem je Polylight 440-700.

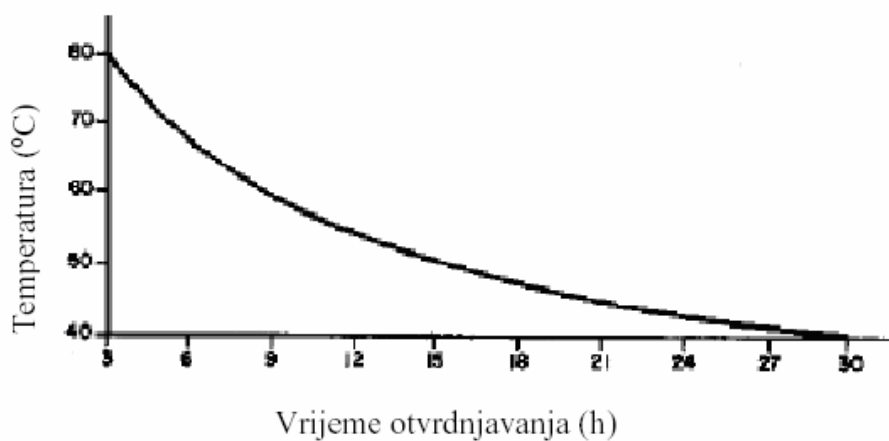
Orto-smola ima sljedeće karakteristike:

- koncentracija stirena u radnoj okolini je 85 g/m<sup>3</sup>
- smola je predubrzana
- vrijeme polimerizacije, uz dodatak 2% katalizatora, je 25 min pri temperaturi od 25°C

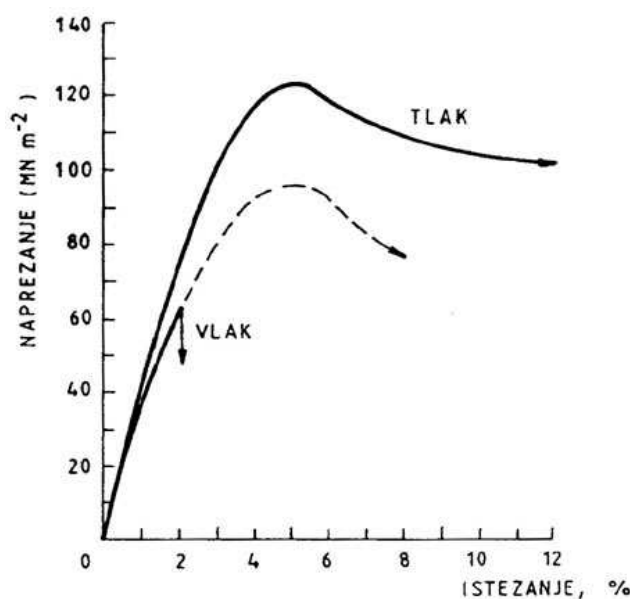
Sljedeći dijagrami prikazuju potrebno vrijeme želiranja i otvrdnjavanja smole ovisno o temperaturi.



Dijagram 2.6 Ovisnost temperature i vremena želiranja smole



Dijagram 2.7 Ovisnost temperature i vremenskog razdoblja otvrdnjavanja



**Dijagram 2.8** Krivulje naprezanje-istezanje za vlačno i tlačno opterećenje poliesterske smole

Puna linija u dijagramu 2.9 predstavlja eksperimentalnu krivulju naprezanje-istezanje za poliestersku smolu koja je podvrgnuta vlačnom i tlačnom jednosmjernom opterećenju. Vlačna prekidna čvrstoća u ovom slučaju iznosi  $63 \text{ MN/m}^2$ , a istezanje 2% i nema znaka popuštanja prije loma, dok se pri tlačnom opterećenju javlja široki raspon popuštanja i znatno je viša maksimalna čvrstoća izdržljivosti te iznosi  $122 \text{ MN/m}^2$ . Plastična deformacija koja je karakteristična za tlačno opterećenje ne događa se pri vlačnom opterećenju jer je spriječena prijevremenim lomom koji nastaje istovremeno s pukotinama u materijalu i na njegovoj površini. Kod ove vrste plastičnih masa gdje postoji popuštanje pri vlačnom naprezanju omjer čvrstoće popuštanja pri tlaku i čvrstoće popuštanja pri vlaku iznosi 1,3. Isprekidana linija predstavlja zamišljenu krivulju koja se dobije u slučaju kada je prijevremeni lom spriječen.

**Potrebna količina poliesterske smole**

U tablici 2.9 izračunata je ukupna masa smole potrebna za laminiranje pojedinog konstrukcijskog dijela trupa brodice, sa rezervom od 10%.

**Tablica 2.9 Potrebna količina poliesterske smole**

Element	Debljina laminata	Masa smole	Površina	Masa	Dodatak 10 %		Ukupna površina	Ukupna masa
	[mm]	[g/m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]
DNO	6,6	6406,65	19,95	127,81	2,00	12,78	21,95	140,59
PALUBA	4,5	4456,80	20,05	89,36	2,01	8,94	22,06	98,29
ROŠTILJ DNA	3,3	3342,60	8,15	27,24	0,82	2,72	8,97	29,97
KRMENO ZRCALO	4,2	4178,25	2,75	11,49	0,28	1,15	3,03	12,64
PREGRADE	1,4	1392,75	1,80	2,51	0,18	0,25	1,98	2,76
$\Sigma =$			52,70	258,41	5,27	25,84	57,97	284,25

### 2.2.3 Gelcoat

Gelcoat je zaštitno dekorativni sloj laminata. Osim što odljevku daje odgovarajući sjaj i boju o njemu ovisi i trajnost odljevka iz stakloplastike jer je on izložen raznim nečistoćama, udarima, sunčevim zrakama, abraziji i drugim mehaničkim djelovanjima te je u stalnom doticaju sa vodom.

Kao zaštitno dekorativni sloj odabran je Viapal 4780 gelcoat, nezasićena visoko tiksotropirana poliesterska smola. Ima svojstva koja mora imati dobar završni dekorativni sloj: vrlo dobru elastičnost, dobru postojanost na apsorpciju vode i agresivne medije, dobru postojanost na UV zračenja i dobar sjaj.

Viapal gelcoat je tanki, nearmirani sloj koji prekriva laminat sa vanjske strane, štiti ga od korozije, a istovremeno daje predmetu ljepši izgled. [5]

Gelcoat je završni sloj koji se prvi stavlja ako se radi o izradi u ženskom kalupu. Preferirana metoda je raspršivanjem iako se može nanositi i kistom i valjkom. Debljina premaza ručnim postupkom kreće se od 0,5-0,7 mm, a potrošak smole od 500 – 700 g/m<sup>2</sup>.

Kao sredstvo za pranje alata koristi se aceton.

**Tablica 2.10** Orientacijska vremena želiranja gelcoata Viapal 4780 kod 20°C

Gelcoat	Katalizator	Vrijeme želiranja	Vrijeme otvrdnjava
g	ml	min	min
100	2	15-25	20-30
100	1	25-35	30-40

Važno je razlikovati vrijeme želiranja (radno vrijeme prerade, tj. vrijeme polimerizacije) gelcoata u posudi koje je kraće od vremena otvrdnjavanja na kalupu.



**Potrebna količina gelcoata**

Gelcoat se nanosi ručno, u dva sloja debljine 0,7 mm.

**Tablica 2.11 Potrebna količina gelcoata**

Element	Debljina sloja	Masa gelcoata	Površina	Masa	Dodatak 10 %		Ukupna površina	Ukupna masa
	[mm]	[g/m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]
DNO	1,4	700	19,95	13,97	2,00	1,40	21,95	15,36
PALUBA	1,4	700	20,05	14,04	2,01	1,40	22,06	15,44
$\Sigma =$							44,00	30,80

Gelcoat u pravilu nije potrebno razrjeđivati jer je prilagođen određenom načinu nanošenja. Za otvrdnjavanje gelcoata ključni su radni uvjeti prerade i vrijeme otvrdnjavanja. Brzina otvrdnjavanja gelcoata između ostalog ovisi i o temperaturi okoline, relativnoj vlažnosti i strujanju zraka. Radni prostor u kome se prerađuje gelcoat mora imati temperaturu od 16 – 25 uz napomenu da se ispod 16°C ne preporuča raditi. Relativna vlažnost u prostoriji ne smije prelaziti 66 %. Iz toga proizlazi da svaki pogon za preradu poliestera mora imati termometar i higrometar, što propisuje i Hrvatski registar brodova. Radne prostorije moraju biti čiste, bez prašine i neposrednog utjecaja sunčeve svjetlosti. Prostorija mora biti ventilirana, ali ventilacija ne smije uzrokovati povećano hlađenje otapala iz smole. Jako struja zraka uzrokuje prebrzo otvrdnjavanje stirena. Posljedica toga je nedovoljna polimerizacija što se očituje nedovoljnom tvrdoćom laminata. Da bi se to moglo pratiti, svaka proizvodnja poliesterskih kompozita mora imati BARCOL 934-7 IMPRESOR aparat za ispitivanje tvrdoće po Barcolu, što također propisuje Hrvatski registar brodova. Također treba imati menzure za doziranje katalizatora i ubrzivača.

Ako temperatura u skladištu padne ispod 16°C, prije početka rada smolu je potrebno kondicionirati na sobnu temperaturu. Isto vrijedi i za staklena ojačanja.

Potrebno vrijeme otvrdnjavanja može varirati, ovisno o uvjetima rada pa se preporuča proba prstom – gelcoat se treba lijepiti za prst, ali ne smije ostajati na njemu. Ljepljivost već očvrstnurog premaza omogućava besprijekorno povezivanje s laminatom. Otvrdnjavanje gelcoata obavlja se uglavnom samo uz dodatak katalizatora, jer su gelcoati u načelu predubrzani.

## 2.2.4 Topcoat

Topcoat je zaštitni sloj koji je po sastavu iso poliesterska smola. Ima vrlo dobru elastičnost, postojanost na apsorpciju vode i agresivne medije. Koristi se na dijelovima laminata trupa koji su u doticaju sa sgresivnim medijima i vodom, a ne moraju imati glatku površinu.

Topcoat je predubrzano, kao i gelcoat, a polimerizira uz dodatak 2 % katalizatora.

### Potrebna količina topcoata

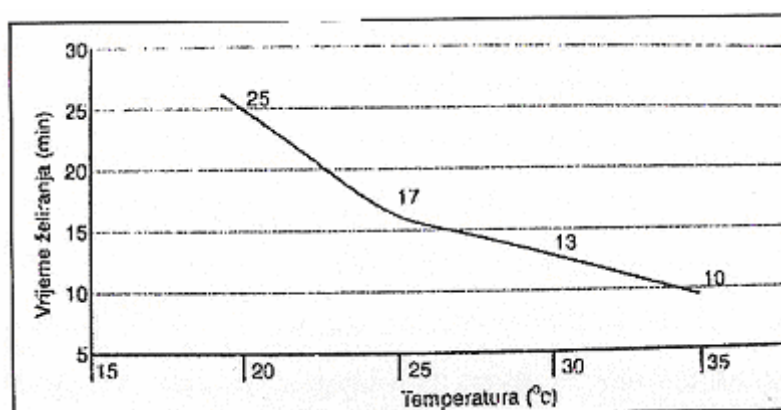
Tablica 2.12 Potrebna količina topcoata

Element	Debljina sloja	Masa topcoata	Površina	Masa	Dodatak 10 %		Ukupna površina	Ukupna masa
	[mm]	[g/m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]
DNO	1,6	800	12,00	9,60	1,20	0,96	13,20	10,56
PALUBA	1,6	800	10,00	8,00	1,00	0,80	11,00	8,80
$\Sigma =$							24,20	19,36

## 2.2.5 Katalizator

Katalizatori su sredstva koja se dodaju smolama kako bi započela polimerizacija. Proizvode se u obliku praha, paste i tekućine. Količina katalizatora koji se dodaje smoli određena je od strane proizvođača, a obično se kreće od 1-2%.

Kao katalizatori najčešće se upotrebljavaju organski peroksidi, npr. metil-etil-keton peroksid (MEKP). MEKP katalizator 2% polimerizira smolu u roku od 25 minuta pri temperaturi 20°C.



Dijagram 2.9 Odnos vremena želiranja katalizatora i temperature okoline

Katalizator se mora dobro izmješati sa smolom da bi se dobio jednoličan proizvod. Mješati se mora polagano da ne bi došlo do stvaranja mjehurića zraka. Uspješnije je kad se zamiješaju dodaci s malom količinom smole, a zatim se tako zamiješana masa doda cjelokupnoj masi. MEKP u koncentriranom obliku i u organskim otapalima vrlo su opasni za oči. Pri rukovanju organskim peroksidima ne smije ih se dovoditi u doticaj sa organskim tvarima jer mogu izazvati spontano paljenje. Prostorije u kojima se katalizator skladišti moraju biti mračne i maksimalne temperature do 22C. [6]

### *Potrebna količina katalizatora*

Tablica 2.13 Potrebna količina katalizatora

	Masa	Količina katalizatora 2%
	[kg]	[l]
Smola	284,25	5,69
Gelcoat	30,08	0,60
Topcoat	19,36	0,39
$\Sigma =$	333,69	6,67

### 2.2.6 Odvajač za kalupe

Odvajač služi kako bi se spriječilo lijepljenje odljevka za kalup i na taj način osiguralo jednostavno vađenje, bez oštećenja. Broj materijala koji se potencijalno mogu koristiti kao odvajači za kalupe vrlo je velik.

Postoje tri osnovne grupe odvajača za kalupe:

- Jednokratni
- Unutarnji
- Polutrajni

Jednokratni odvajači koa što su voskovi, sapuni, silikon odvajaju uslijed izostanka kohezivne sile. Prilikom vađenja iz kalupa oni se troše, dio ostaje na kalupu, a dio na odljevku.

Zbog toga imamo neke negativne posljedice, a to je prije svega potreba da ga treba često obnavljati, a odljevak bez prethodne obrade nije moguće npr. bojati ili lijepiti. Financijski to znači više utrošenog odvajača i vremena te troškova naknadne obrade.

Unutarnji odvajači dodaju se u masu koja se lijeva te djeluju tako da prilikom sušenja mase migriraju prema površini i djeluju slično kao i jednokratni. Kao i u prvom slučaju, površine se teško obrađuju (npr.boje) s obzirom da se radi o trajno prisutnom sredstvu na površini. Tu se također radi o voskovima, silikonima i sapunima.

Najnovija generacija odvajača za kalupe bazira se na polimernim materijalima koji se na površini kalupa suše u obliku nemasnog filma. [5]

**Potrebna količina odvajača**

Odabran je polimerni polutrajni odvajač iz linije Frekote. Uz upotrebu polutrajnog odvajača bitno se smanjuje vrijeme pripreme kalupa (postupak je i do 10 puta brži u odnosu na vosak). Odvajač se nanosi u 2 sloja čija je ukupna debljina 0,2 mm, a utošak oko 200 ml/m<sup>2</sup>. Nanosi se pamučnom krpom na manju površinu kalupa, te se odmah istrlja čistom krpom da se ukloni višak.

**Tablica 2.14 Potrebna količina odvajača**

Element	Debljina sloja	Količina odvajača	Površina	Količina odvajača	Dodatak 10 %		Ukupna površina	Ukupna količina
	[mm]	[l/m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[l]	[m <sup>2</sup> ]	[l]	[m <sup>2</sup> ]	[l]
DNO	0,2	0,2	19,95	3,99	2,00	0,40	21,95	4,39
PALUBA	0,2	0,2	20,05	4,01	2,01	0,40	22,06	4,41
ROŠTILJ DNA	0,2	0,2	8,15	1,63	0,82	0,16	8,97	1,79
$\Sigma =$							44,00	8,80

**2.2.7 Ukrepe dna**

Za ukrepe dna koristi se nepropusna šperploča koja se kao jezgra laminira na krmeno zrcalo i na pramčanu pregradu. Ukupna potrebna površina ukrepa dna je 2,22 m<sup>2</sup>.

**Tablica 2.15 Potrebna količina šperploče**

	Debljina	Širina	Duljina	Količina	Površina
	[cm]	[m]	[m]		[m <sup>2</sup> ]
Šperploča	3,5	1,5	2	1	3

### 3 RUČNO LAMINIRANJE – POSTUPCI I FAZE IZRADE

Ručni kontaktni postupak laminiranja je najčešće korišteni postupak za izradu objekata različitih veličina. Gradnja brodice ovim postupkom sastoji se od:

- Izrade modela
- Izrade kalupa
- Izrade odljevka

Postupak gradnje brodice iz stakloplastike započinje izradom kalupa prema modelu.

Model je ručno izrađena kopija gotovog trupa i obično se izrađuje od drveta. Pri izradi kalupa vrlo je važan visok stupanj glatkoće modela jer će se svaka greška na površini modela prenijeti na kalup, a time i na trup. Nakon što je dobivena forma od drveta, spojevi i neravnine na modelu se kitaju i bruse. Kada su sve površine dovedene do određenog stupnja glatkoće, prekrivaju se sa jednim do dva sloja tankog mata koji se brusi kad dovoljno očvrstne. Na takvu površinu nanosi se sloj gelcoata koji se na koncu polira do visokog sjaja.

Dijelovi modela koji služe za izradu manjih dijelova trupa moraju biti odvojivi od trupa.

Pomoću tih modela izrađuju se kalupi u kojima se grade pojedini dijelovi brodice.

Pri izradi kalupa bitna je preciznost i forma, žilavost i finoća površine jer su to sve faktori koji utječu na trajnost kalupa, tj. na broj odljevaka koji se mogu dobiti iz jednog kalupa. [7]

Prednosti ručnog kontaktnog postupka:

- Jednostavnost
- Minimalni troškovi
- Rad na sobnoj temperaturi
- Mali radni prostor

Nedostaci ručnog kontaktnog postupka:

- Ekološki vrlo nepovoljan postupak zbog velikog isparavanja nevezanog stirenmonomera
- Nije moguće postići maksimalna mehanička svojstva staklenog ojačanja
- Veliki udio rada u cijeni proizvoda

### **3.1 POSTUPAK IZRADE ODLJEVKA RUČNIM LAMINIRANJEM**

Postupak izrade odljevja ručnim (kontaktnim) postupkom započinje nanošenjem sloja odvajачa, a zatim nanošenjem sloja gelcoata. Nakon toga slijedi nanošenje smole u koju se polaže sloj tanke staklene armature, mata. Nakon što taj sloj otvrdne, nanosi se više slojeva staklene armature (kombinacija mata i rovinga) i smole, sve dok se ne postigne željena debljina laminata. Svaki sloj staklene armature se mora utisnuti u smolu i prethodni sloj i to sa valjcima kojima se istiskuje zrak iz slojeva laminata.

Otvrdnjavanje laminata vrši se na sobnoj temperaturi. Laminat je osušen nakon minimalno 48 sati, ali njegova potpuna čvrstoća postiže se nakon 2-3 tjedna.

#### **3.1.1 Nanošenje sredstva za odvajanje**

Nakon čišćenja kalupa nanosi sredstvo za odvajanje. Kao odvajач korišten je polutrajni odvajач iz linije Frekote. Nanosi se pamučnom krpom na manju površinu kalupa (cca. 50 cm x 50 cm). Čim se proizvod počne sušiti na površini kalupa (nakon nekoliko skundi), odmah se istrlja čistom suhom krpom da se otkloni višak. Postupak se ponavlja dok se ne prekrije cijeli kalup. Jednom osušen, sloj polimerizira tvoreći jednoliki film. Nakon «prve ruke» proizvod se nanosi u još nekoliko slojeva (ovisno o stanju kalupa, odabranom odvajачu i sl.), u ovom slučaju u 2 sloja. Vremenski intervali između pojedinih nanosa kao i između posljednjeg nanosa i početka laminiranja variraju o korištenom proizvodu i uvjetima sušenja.

S ovim odvajачem moguća su višestruka odvajanja, kod manjih kalupa i do 50 odvajanja, a kod velikih kalupa 10-15 odvajanja. [5]

Proizvod osigurava i vrlo visoki sjaj bez ikakve potrebe za doradom npr. poliranjem.

Debljina sloja odvajачa iznosi 0,1 mm u jednom sloju, a ukupna debljina je 0,2 mm tako da nema nagomilavanja, a geometrija kalupa se potpuno identično preslikava na odljevak.

Sredstvo za odvajanje na kalup nanose 9 radnika u vremenu od 1,5 sata.

### 3.1.2 Nanošenje gelcoata

Gelcoat se nanosi ručno u dva sloja od kojih je svaki debljine 0,7 mm (slika 3.1). Gelcoat se katalizira tako da svaki sloj katalizira zasebno, jer je vrijeme polimerizacije oko 25 minuta pri 20°C. U tome vremenu treba gelcoat ravnomjerno nanijeti na cijelu površinu kalupa.

Gelcoatu treba dodati 2 % katalizatora.

Svaki sloj gelcoata suši se oko 12 sati, nanose ga 4 radnika te im je za svaki sloj potrebno oko sat vremena.



**Slika 3.1 Nanošenje zaštitno - dekorativnog sloja**

U radu sa gelcoatom treba pripaziti na određene pogreške koje mogu uzrokovati nabiranje zaštitno-dekorativnog sloja.

Pri nanošenju gelcoata sa pištoljem za raspršivanje, ako otapalo ne ishlapi na putu između pištolja i kalupa može ostati „zarobljeno“ u premazu i tako inhibirati umrežavanje jer ne sudjeluje u polimerizaciji. Zaostali aceton uzrokuje u laminatu veće razrjeđenje neumreženog gelcoata zbog čega pri otvrdnjavanju dolazi do podizanja laminata, pojave mjehura i nabiranja(površina ima izgled narančine kore).

Da bi se to izbjeglo svakako treba izbjegavati razređivanje gelcoata acetonom.



Nabiranje gelcoata može prouzročiti i laminiranje na još neotvrdnutom gelcoatu.

Način otklanjanja je povećati dodatak katalizatora. Treba raditi kod sobne temperature 18 – 22°C. Izvršiti probu prstom te obavezno izbjegavati otapalo za razrjeđivanje.

Povećana vlažnost zraka tijekom vlažnih dana može inhibirati umrežavanje.

Potrebno je provjeriti da li su svi vodovi za zrak suhi i zrak sušiti prije raspršivanja. Koristiti higrometar radi provjere stanja vlažnosti u radnom prostoru.

Nakon nanošenja gelcoata, svi alati se moraju očistiti. Kante se ostavljaju da se osuše jer će se preostala smola stvrdnuti te ju se nakon nekoliko sati može sastrugati. Valjci i četke se moraju detaljno oprati acetonom. Aceton je lako zapaljiva tekućina i lako isparava. Oni dijelovi tijela koji moraju biti u doticaju sa smolom, radnici moraju najprije očistiti acetonom, a tek onda sapunom i čistom vodom. Isto vrijedi i za alate. Četke i valjci se moraju osušiti prije ponovne upotrebe.

### 3.1.3 Postupak laminiranja

Sa laminiranjem se može započeti kada je gelcoat dovoljno tvrd. Najjednostavnija proba je proba prstom. Gelcoat se mora lijepiti za prst, ali ne smije ostajati na njemu.

**Prvi sloj** laminata sastoji se od mata gramature  $300 \text{ g/m}^2$  i  $450 \text{ g/m}^2$  ( $300 \text{ g/m}^2$  za roštilj dna). Na gelcoat natopljen smolom nanosi se prvo sloj mata od  $300 \text{ g/m}^2$ .

Za prvi sloj staklenog ojačanja koje dolazi na gelcoat preporučljivo je da bude manje gramature jer se time dobiva bolja veza sa završnim slojem i ljepši izgled površine. Prvi sloj mora biti dobro namočen smolom te treba paziti da ne ostane zarobljenih mjehurića zraka između tog prvog sloja i gelcoata.

Vrijeme polimeriziranja smole je max 25 min. pri  $20^\circ\text{C}$  te je vrlo važno da sloj laminata bude postavljen u tom vremenu.

Staklena armatura postavlja se okomito na uzdužnu os kalupa. Širina staklene armature je 125 cm. Za svaki dio sloja, smola se posebno priprema, te svaki od tih dijelova laminat mora biti postavljen u roku od 25 minuta.

U roku od 25 minuta postavlja se idući sloj mata od  $450 \text{ g/m}^2$ , za sve konstruktivne dijelove osim roštilja dna gdje je i drugi sloj mat od  $300 \text{ g/m}^2$ . Drugi sloj se postavlja sa uzdužnim pomakom od 50 mm da ne bi došlo do preklapanja spojeva dijelova prvog i drugog sloja mata. Takvo postavljanje osigurava zadovoljavajuću čvrstoću odljevka.

Za svaki odljevak izračunata je potrebna količina staklene armature, smole i katalizatora za svaki pojedino sloj (poglavlja 3.1.3.1 - 3.1.3.3.).

**Drugi sloj** se sastoji od mata gramature  $300 \text{ g/m}^2$  ( $450 \text{ g/m}^2$  za krmeno zrcalo), rovinga  $600 \text{ g/m}^2$  i mata  $300 \text{ g/m}^2$  ( $450 \text{ g/m}^2$  za krmeno zrcalo). Sa postavljanjem drugog sloja kreće se kad je prvi sloj potpuno otvrdnuo, za što je potrebno minimalno 12 sati.

Smola je predubrzana i priprema se dodavanjem katalizatora (MKEP-2%) te se priprema za svaki dio posebno.

Vrijeme polimeriziranja smole je max. 25 minuta pri temperaturi od  $20^\circ\text{C}$ .

Na prvi sloj mata nanosi se roving  $600 \text{ g/m}^2$  koji se prije namoči smolom. Kod postavljanja rovinga treba obratiti pozornost na oštrim rubovima gdje može zaostati zrak i dovesti do

stvaranja pukotina. Zadnji sloj je opet sloj mata  $300 \text{ g/m}^2$  (osim za krmeno zrcalo gdje je zadnji sloj mat  $450 \text{ g/m}^2$ )

**Treći sloj** sastoji od mata gramature  $450 \text{ g/m}^2$ , rovinga  $600 \text{ g/m}^2$  i  $450 \text{ g/m}^2$  za dno brodice, a za palubu samo od sloja mata gramature  $450 \text{ g/m}^2$ . Postupak je isti kao i kod postavljanja drugog sloja.

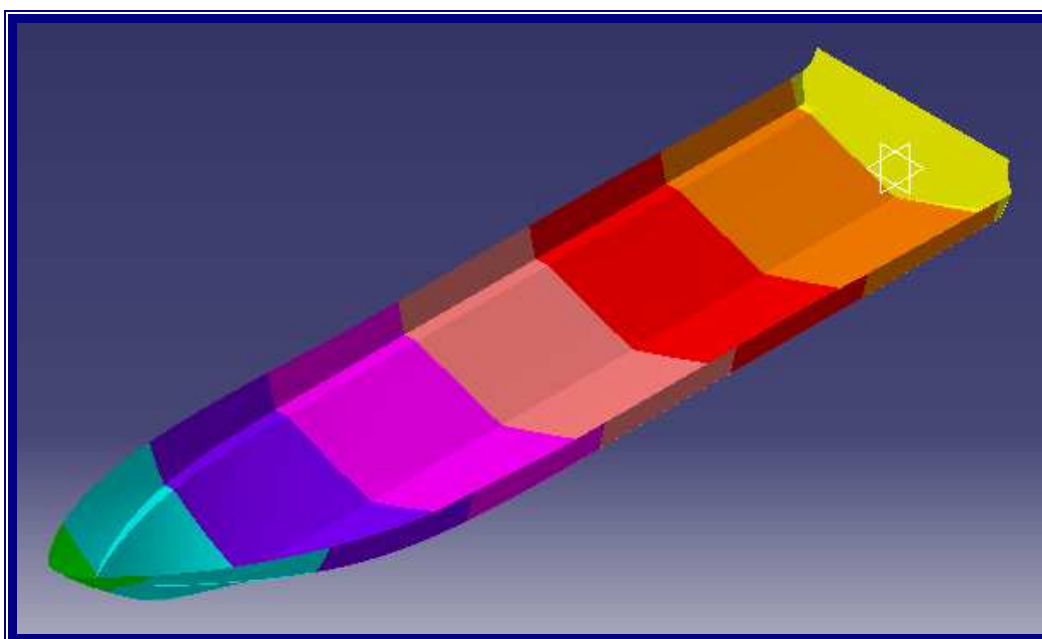
Kod postupka ručnog laminiranja potreban broj radnika određuje se prema površini odljevka i uvjetu da svaki sloj laminata mora biti postavljen u zahtjevanom vremenu od 25 minuta koliko iznosi vrijeme polimeriziranja smole.

Za laminiranje odljevaka brodice ove veličine potrebno je 6 radnika.

Važno je održavati stalne uvjete u radionici: temperaturu od  $20^\circ\text{C}$  i relativnu vlažnost zraka ne veću od 70 %.

### 3.1.3.1 Odljevak dna

U ovom poglavlju dan je plan laminiranja odljevka dna sa potrebnim količinama materijala po slojevima i dijelovima laminata koje su dane u tablici 3.1. Laminat dna slaže se u 3 sloja, a kalup je podjeljen na 8 dijelova kao što je prikazano na slici 3.2. Za svaki dio sloja, smola se posebno priprema, te svaki od tih dijelova laminata mora biti postavljen u roku od 25 minuta. Redosljed postavljanja laminata sa potrebnim vremenima laminiranja dan je u tablici 3.2.



Slika 3.2 Odljevak dna

Tablica 3.1 Količine materijala po slojevima laminata dna

		DIO POVRŠINE DNA									
DNO		zrcalo	1	2	3	4	5	6	7		
površina	[m <sup>2</sup> ]	1,43	3,01	3,16	3,17	3,18	3,14	2,48	0,38	19,95	
10 % površine	[m <sup>2</sup> ]	0,14	0,30	0,32	0,32	0,32	0,31	0,25	0,04	2,00	
ukupno	[m <sup>2</sup> ]	1,57	3,31	3,48	3,49	3,50	3,45	2,73	0,42	21,95	
SLOJ 1	duljina stakla	[m]	1,26	2,65	2,78	2,79	2,80	2,76	2,18	0,33	17,56
	masa stakla M 300	[kg]	0,47	0,99	1,04	1,05	1,05	1,04	0,82	0,13	
	masa smole	[kg]	0,88	1,86	1,96	1,96	1,97	1,94	1,53	0,24	12,34
	količina katalizatora	[ml]	17,70	37,25	39,11	39,23	39,35	38,86	30,69	4,70	246,88
	duljina stakla	[m]	1,26	2,65	2,78	2,79	2,80	2,76	2,18	0,33	17,56
	masa stakla M 450	[kg]	0,71	1,49	1,56	1,57	1,57	1,55	1,23	0,19	
	masa smole	[kg]	1,33	2,79	2,93	2,94	2,95	2,91	2,30	0,35	18,52
	količina katalizatora	[ml]	26,54	55,87	58,66	58,84	59,03	58,29	46,04	7,05	370,32
SLOJ 2	duljina stakla	[m]	1,26	2,65	2,78	2,79	2,80	2,76	2,18	0,33	17,56
	masa stakla M 300	[kg]	0,47	0,99	1,04	1,05	1,05	1,04	0,82	0,13	
	masa smole	[kg]	0,88	1,86	1,96	1,96	1,97	1,94	1,53	0,24	12,34
	količina katalizatora	[ml]	17,70	37,25	39,11	39,23	39,35	38,86	30,69	4,70	246,88
	duljina stakla	[m]	1,26	2,65	2,78	2,79	2,80	2,76	2,18	0,33	17,56
	masa stakla R 600	[kg]	0,94	1,99	2,09	2,09	2,10	2,07	1,64	0,25	
	masa smole	[kg]	1,77	3,72	3,91	3,92	3,94	3,89	3,07	0,47	24,69
	količina katalizatora	[ml]	35,39	74,50	78,21	78,46	78,71	77,72	61,38	9,41	493,76
SLOJ 3	duljina stakla	[m]	1,26	2,65	2,78	2,79	2,80	2,76	2,18	0,33	17,56
	masa stakla M 300	[kg]	0,47	0,99	1,04	1,05	1,05	1,04	0,82	0,13	
	masa smole	[kg]	0,88	1,86	1,96	1,96	1,97	1,94	1,53	0,24	12,34
	količina katalizatora	[ml]	17,70	37,25	39,11	39,23	39,35	38,86	30,69	4,70	246,88
	duljina stakla	[m]	1,26	2,65	2,78	2,79	2,80	2,76	2,18	0,33	17,56
	masa stakla M 450	[kg]	0,71	1,49	1,56	1,57	1,57	1,55	1,23	0,19	
	masa smole	[kg]	1,33	2,79	2,93	2,94	2,95	2,91	2,30	0,35	18,52
	količina katalizatora	[ml]	26,54	55,87	58,66	58,84	59,03	58,29	46,04	7,05	370,32

Tablica 3.2 Redosljed laminiranja odljevka dna

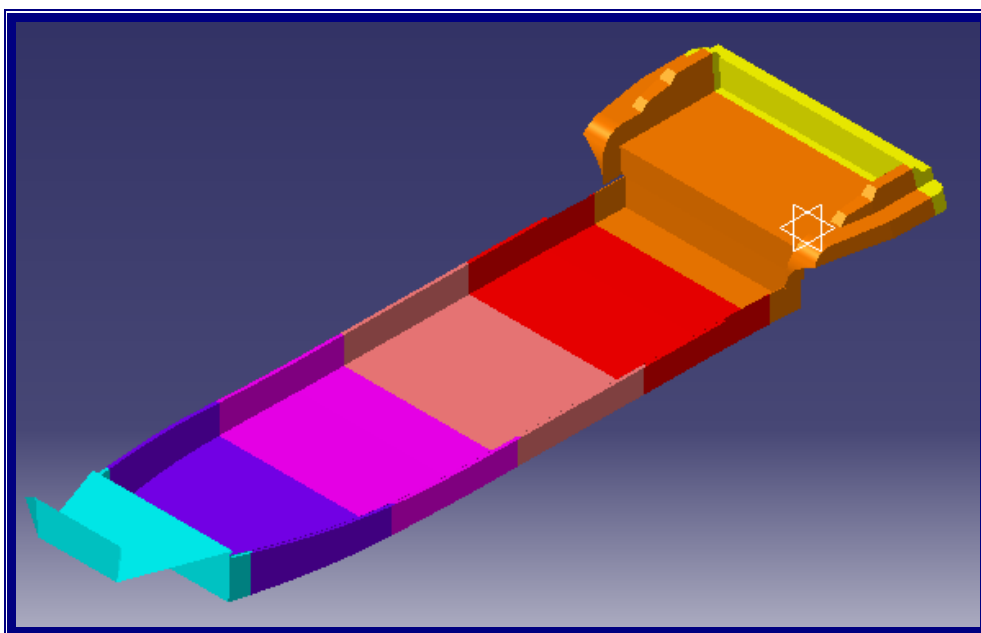
	Vrijeme laminiranja [min]	DIO POVRŠINE DNA							
		zrcalo	1	2	3	4	5	6	7
SLOJ 1	25	M 300							
	25	M 450	M 300						
	25		M 450	M 300					
	25			M 450	M 300				
	25				M 450	M 300			
	25					M 450	M 300		
	25						M 450	M 300	
	25							M 450	M 300
SLOJ 2	25								M 450
	25	M 300							
	25	R 600	M 300						
	25	M 300	R 600	M 300					
	25		M 300	R 600	M 300				
	25			M 300	R 600	M 300			
	25				M 300	R 600	M 300		
	25					M 300	R 600	M 300	
SLOJ 3	25							M 300	M 300
	25								R 600
	25								M 300
	25	M 450							
	25	R 600	M 450						
	25	M 450	R 600	M 450					
	25		M 450	R 600	M 450				
	25			M 450	R 600	M 450			
	25					M 450	R 600	M 450	
	25						M 450	R 600	M 450
	25							M 450	R 600
	25								M 450
	25								
	25								
	25								
	25								
	725								

Za laminiranje dna potrebno je 6 radnika, od toga 4 radnika postavljaju laminat prvog sloja, a 6 radnika laminat drugog i trećeg sloja, a 2 radnika zadužena su za pripremu smole.

Vrijeme potrebno za postavljanje laminata dna je 10 sati, a za potpuno otvrdnjavanje smole još 16 sati. Potpunu čvrstoću laminat postiže nakon 2 – 3 tjedna.

### 3.1.3.2 Odljevak palube

Laminat odljevka palube slaže se u 3 sloja, a kalup je podjeljen na 7 dijelova kao što je prikazano na slici 3.3. Plan postavljanja laminata odljevka palube te potrebne količine materijala po slojevima laminata dane su tablici 3.3. Za svaki dio sloja, smola se posebno priprema, te svaki od tih dijelova laminata mora biti postavljen u roku od 25 minuta. Redosljed postavljanja laminata dan je u tablici 3.4.



Slika 3.3 Odljevak palube

Tablica 3.3 Količine materijala po slojevima laminata palube

		DIO POVRŠINE PALUBE								
PALUBA		1	2	3	4	5	6	7		
	površina	[m <sup>2</sup> ]	2,17	4,76	2,83	2,83	2,83	2,61	2,02	20,05
	10 % površine	[m <sup>2</sup> ]	0,22	0,48	0,28	0,28	0,28	0,26	0,20	2,01
	ukupno	[m <sup>2</sup> ]	2,39	5,24	3,11	3,11	3,11	2,87	2,22	22,06
SLOJ 1	duljina stakla	[m]	1,91	4,19	2,49	2,49	2,49	2,30	1,78	17,64
	masa stakla M 300	[kg]	0,72	1,57	0,93	0,93	0,93	0,86	0,67	
	masa smole	[kg]	1,34	2,95	1,75	1,75	1,75	1,61	1,25	12,41
	količina katalizatora	[ml]	26,85	58,91	35,02	35,02	35,02	32,30	25,00	248,12
	duljina stakla	[m]	1,91	4,19	2,49	2,49	2,49	2,30	1,78	17,64
	masa stakla M 450	[kg]	1,07	2,36	1,40	1,40	1,40	1,29	1,00	
	masa smole	[kg]	2,01	4,42	2,63	2,63	2,63	2,42	1,87	18,61
	količina katalizatora	[ml]	40,28	88,36	52,53	52,53	52,53	48,45	37,50	372,18
	duljina stakla	[m]	1,91	4,19	2,49	2,49	2,49	2,30	1,78	17,64
	masa stakla M 300	[kg]	0,72	1,57	0,93	0,93	0,93	0,86	0,67	
SLOJ 2	masa smole	[kg]	1,34	2,95	1,75	1,75	1,75	1,61	1,25	12,41
	količina katalizatora	[ml]	26,85	58,91	35,02	35,02	35,02	32,30	25,00	248,12
	duljina stakla	[m]	1,91	4,19	2,49	2,49	2,49	2,30	1,78	17,64
	masa stakla R 600	[kg]	1,43	3,14	1,87	1,87	1,87	1,72	1,33	
	masa smole	[kg]	2,69	5,89	3,50	3,50	3,50	3,23	2,50	24,81
	količina katalizatora	[ml]	53,71	117,81	70,04	70,04	70,04	64,60	50,00	496,24
	duljina stakla	[m]	1,91	4,19	2,49	2,49	2,49	2,30	1,78	17,64
	masa stakla M 300	[kg]	0,72	1,57	0,93	0,93	0,93	0,86	0,67	
	masa smole	[kg]	1,34	2,95	1,75	1,75	1,75	1,61	1,25	12,41
	količina katalizatora	[ml]	26,85	58,91	35,02	35,02	35,02	32,30	25,00	248,12
SLOJ 3	duljina stakla	[m]	1,91	4,19	2,49	2,49	2,49	2,30	1,78	17,64
	masa stakla M 450	[kg]	1,07	2,36	1,40	1,40	1,40	1,29	1,00	
	masa smole	[kg]	2,01	4,42	2,63	2,63	2,63	2,42	1,87	18,61
	količina katalizatora	[ml]	40,28	88,36	52,53	52,53	52,53	48,45	37,50	372,18



Tablica 3.4 Redosljed laminiranja odljevka palube

	Vrijeme laminiranja [min]	DIO POVRŠINE PALUBE						
		1	2	3	4	5	6	7
SLOJ 1	25	M 300						
	25	M 450	M 300					
	25		M 450	M 300				
	25			M 450	M 300			
	25				M 450	M 300		
	25					M 450	M 300	
	25						M 450	M 300
	25							M 450
SLOJ 2	25	M 300						
	25	R 600	M 300					
	25	M 300	R 600	M 300				
	25		M 300	R 600	M 300			
	25			M 300	R 600	M 300		
	25				M 300	R 600	M 300	
	25					M 300	R 600	M 300
	25						M 300	R 600
SLOJ 3	25	M 450						
	25		M 450					
	25			M 450				
	25				M 450			
	25					M 450		
	25						M 450	
	25							M 450
	600							

Za laminiranje palube također je potrebno 6 radnika, prvi sloj postavlja 4 radnika, drugi sloj 6, a posljednji sloj 2 radnika, dok su 2 radnika posebno zadužena za pripremu smole.

Vrijeme potrebno za postavljanje laminata palube je 12 sati, a za potpuno otvrdnjavanje smole još 16 sati. Potpunu čvrstoću laminat postiže nakon 2 – 3 tjedna.

### 3.1.3.3 Roštilj i ukrepe dna

Roštilj dna laminira se u dva sloja. Prvi sloj armature se sastoji od dva sloja mata 300 g/m<sup>2</sup>, a drugi sloj od mata 300 g/m<sup>2</sup> rovinga 600 g/m<sup>2</sup> i mata 300 g/m<sup>2</sup>.



Slika 3.4 Izrada roštilja dna

Roštilj dna laminira 6 radnika. 2 radnika laminiraju uzdužnjake roštilja podjelene na 5 jednakih dijelova, a druga 2 radnika paralelno laminiraju poprečna ojačanja roštilja, dok 2 radnika pripremaju potrebnu smolu.

Tablica 3.5 Redosljed laminiranja odljevka roštilja dna

	Vrijeme laminiranja [min]	DIO POVRŠINE ROŠTILJA				
		1	2	3	4	5
SLOJ 1	25	M 300				
	25	M 300	M 300			
	25		M 300	M 300		
	25			M 300	M 300	
	25				M 300	M 300
	25					M 300
SLOJ 2	25	M 300				
	25	R 600	M 300			
	25	M 300	R 600	M 300		
	25		M 300	R 600	M 300	
	25			M 300	R 600	M 300
	25				M 300	R 600
	25					M 300
	325					

Roštilj se sa dnom spaja slojem laminata strukture mat 450 g/m<sup>2</sup> roving 600 g/m<sup>2</sup> te mat 450 g/m<sup>2</sup> (slika 3.5).



**Slika 3.5 Postavljanje i učvršćivanje roštilja dna**

Ukrepe se postavljaju da bi se postigla dodatna čvrstoća određenih dijelova dna brodice i kao pregrade određenih prostora u brodici. Ukrepe se postavljaju na odljevak dna dok se još nalazi u kalupu. Materijal ukrepa je šperploča.

Na trupu ove brodice kao ukrepe od šperploče postoji ojačanje krmenog zrcala i pramčana pregrada. Krmeno zrcalo laminira se u 2 sloja, mat 300 g/m<sup>2</sup> i mat 450 g/m<sup>2</sup>, te zatim drugi sloj mat 450 g/m<sup>2</sup> roving 600 g/m<sup>2</sup> i mat 450 g/m<sup>2</sup>. Pramčana pregrada laminira se samo sa jednim slojem sastava mat 300 g/m<sup>2</sup> i mat 450 g/m<sup>2</sup>.

### 3.1.4 Spajanje odljevaka

Nakon što je postavljen roštilj i ukrepe dna odljevci se spajaju. Spajanje se može izvršiti tek kada je odljevak palube moguće izvaditi iz kalupa, što je minimalno 12 sati nakon postavljanja zadnjeg sloja laminata.

Odljevak dna ostaje u kalupu, a paluba se okreće i polaže na dno kako je prikazano na slici 3.6.



Slika 3.6 Polaganje odljevka palube na odljevak dna

Dodirne površine moraju biti dobro pripremljene, izbrušene da se odstrane neravnine, kako bi se osiguralo dobro prijanjanje. Na spojne površine nanosi se sloj smole te se one po cijeloj duljini pričvršćuju stegama (slika 3.7).



Slika 3.7 Spajanje odljevaka palube i dna

U unutarnjoj strani trupa, spoj 2 odljevka laminira se sa 3 sloj staklene armature i to: mat 450 g/m<sup>2</sup>, roving 600 g/m<sup>2</sup> i mat 450 g/m<sup>2</sup> (slika 3.8).



**Slika 3.8 Laminiranje unutarnjeg spoja palube i dna**

## **3.2 RADIONICA ZA IZRADU TRUPA RUČNIM LAMINIRANJEM**

### **3.2.1 Opis brodograđevne radionice i tokovi materijala**

Radionica za izradu brodice iz stakloplastike mora biti takva da osigura neometani tok materijala od skladišta do međuskladišta pojedinih dijelova radionice, te neometani tok proizvoda kroz pojedine radionice.

Moraju biti zadovoljeni zahtjevani klimatizacijski uvjeti, te se izrada brodica mora odvijati u strogo kontroliranim uvjetima da bi se zadržala visoka kvaliteta izrade.

Zbog zahtjevanih klimatizacijskih uvjeta zidovi hale trebaju biti izgrađeni od vodonepropusnog materijala povezanog čvrstom konstrukcijom od čelika i dobro izolirani. Za zidove i krov mogu se koristiti i korugirane čelične pregrade, ali moraju biti izolirane od sunčevog zagrijavanja. Podovi moraju biti od materijala otpornog na vlagu koji se lako čisti od prašine, kao što je beton ili bitumenska smjesa.[6]

Poželjno bi bilo imati odvojene prostorije za nanošenje zaštitno-dekorativnog sloja, od one za laminiranje i obradu trupa nakon vađenja iz kalupa. To je teško osigurati u manjim halama pa se pojedini dijelovi radionice mogu odvojiti zavjesama od teškog platna.

Radionica se može podijeliti na 3 glavna dijela:

- **skladišni dio**
  - A. skladište materijala
  - B. skladište opreme
  - C. skladište gotovih brodica
- **proizvodni dio**
  - 1. prostorija za izradu kalupa
  - 2. prostorija za nanošenje zaštitno dekorativnog sloja
  - 3. prostorija za laminiranje
  - 4. prostorija za postavljanje ukrepa

- međuskладиšni dio pojedinih radionica

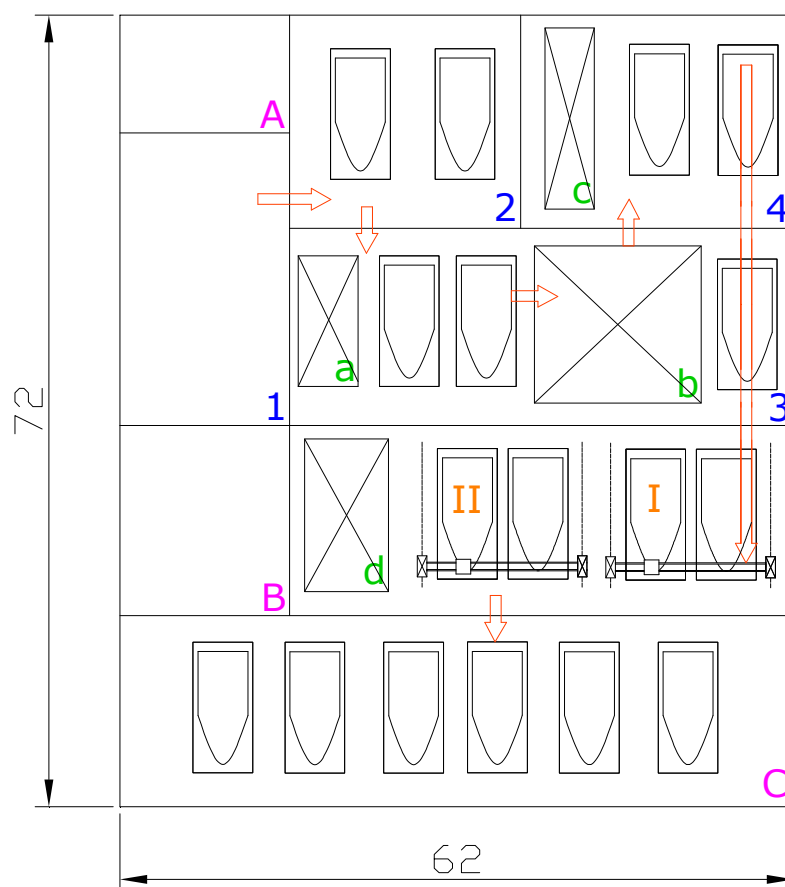
- a. međuskладиšte prostora za laminiranje
- b. međuskладиšte za sušenje laminata
- c. međuskладиšte materijala radionice za postavljanje ukrepa
- d. međuskладиšte radionice za opremanje

- opremni dio

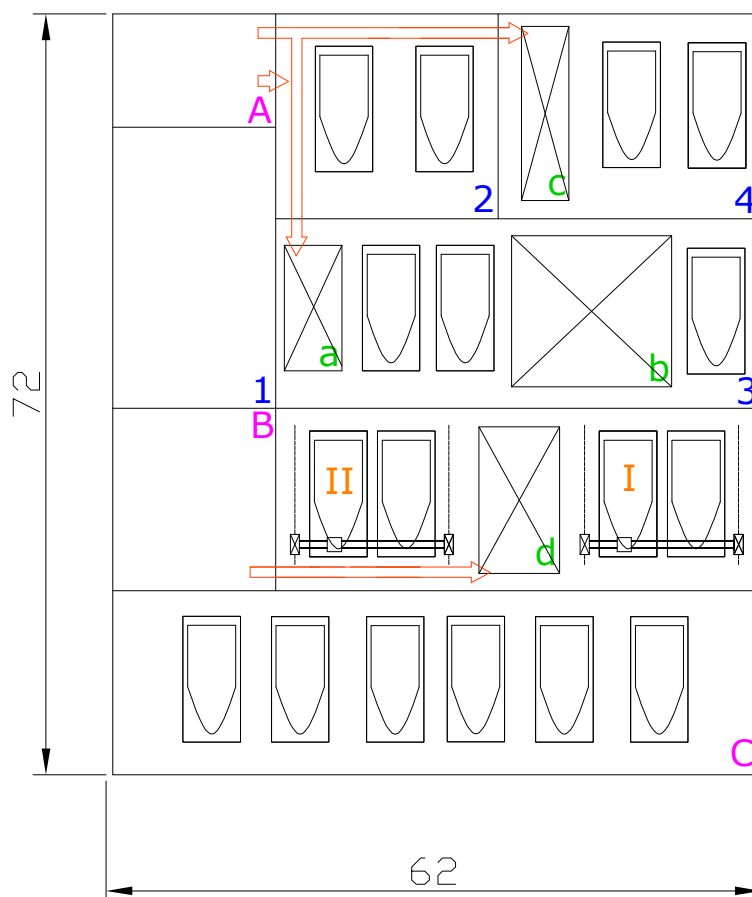
I. prostorija za spajanje dijelova brodice

II. prostorija za opremanje brodice

Na sljedećim shemam prikazan je tlocrt radionice sa označenim tokovima proizvoda i materijala.



Slika 3.9 Shema radionice sa tokovima proizvoda



Slika 3.10 Shema radionice sa tokovima materijala

### Tokovi proizvoda i materijala

Kalup se doprema iz prostorije za izradu kalupa (1) u prostor za nanošenje gelcoata (2). Materijal za izradu kalupa i za nanošenje gelcoata doprema se iz skladišta materijala (A) u međuskladište prostora za laminiranje (a) i u radionicu za nanošenje gelcoata (2). Nakon što je gelcoat osušen kalup ide u prostor za laminiranje (3), koji ima svoje međuskladište (a) u koji je dopremljen sav potreban materijal iz skladišta (A). Nakon postavljanja laminat se suši u istoj prostoriji u međuskladištu za sušenje laminata (b) te nakon toga ide u prostor za postavljanje ukrepa (4) sa svojim međuskladištem materijala (c). Ukrepljeni laminat transportira se u dio radionice za spajanje (I) i opremanje (II). Gotove brodice skladište se u posljednjem dijelu radionice (C).



### 3.2.2 Oprema brodograđevne radionice

- *Klimatizacija, ventilacija i kontrola vlage*

Klimatizacija radionice vrlo je važna zbog polimerizacije smole. Temperatura u radionici trebala bi biti između 18°C i 25°C.

Relativna vlažnost ne bi smjela prelaziti vrijednost od 80 %. Pri većem postotku vlažnosti zraka, staklena bi vlakna pokupila vlagu što može utjecati na proces otvrdnjavanja i međusobnog povezivanja staklenih vlakana.

Za vrijeme laminiranja isparava do 5 % stirena koji isparava i nekoliko sati nakon završetka izrade odljevka. Pare stirena teže su od zraka te se prostorije trebaju ventilirati.

Kod postavljanja ventilacijskih uređaja treba paziti na mjesto postavljanja, jer puhanje direktno na odljevak može uzrokovati njegovo pretjerano isušivanje. Na mjestima gdje se vrši mehanička obrada odljevaka treba postaviti ventilatore koji usisavaju, a ne ispuhuju zrak.

Prašina ne smije dospjeti na mokri laminat, jer bi to usporilo i spriječilo otvrdnjavanje smole.

- *Električne instalacije i instalacije komprimiranog zraka*

Broj utičnica za struju i utikača za komprimirani zrak mora biti dovoljan za količinu alata koji se koristi u proizvodnom procesu. Strujni kablovi i cjevovodi komprimiranog zraka trebaju biti što kraći i ne smiju smetati tokovima materijala. Kod električnih alata treba paziti da ne dolaze u doticaj sa zapaljivim materijalima da ne bi uzrokovali požar.

Alati koji rade na komprimirani zrak, kao npr. oprema za našpricavanje gelcoata ili raspršivanje smole, zahtijevaju stalan dotok istog koji mora imati nizak stupanj vlažnosti kako ne bi došlo do kontaminacije.

- *Rasvjeta*

Radionica mora biti adekvatno osvijetljena prirodnim ili umjetnim svjetlom ili oboma.

Posebno se mora paziti da nema direktnog pada sunčeve svjetlosti na smolu u fazama izrade jer bi to prouzrokovalo njeno preuranjeno skrućivanje i prekomjerno isparavanje stirena što može dovesti do toga da odljevak ostane nestvrdnut. Fluorescentno osvjtljenje treba se postaviti dovoljno visoko iznad površine odljevka jer emitira UV-zračenje i ima sličan učinak kao i sunčeva svjetlost.

- ***Transportna sredstva i alati***

Transportna sredstva u radionici za izradu brodice iz stakloplastike su kolica za kalupe i dizalice u dijelu radionice za spajanje odljevaka i opremanje.

U opremnom dijelu radionice nalaza se 2 dizalice. Dizalica u prostoru za spajanje odljevaka je nosivosti 2 t, a u prostoru za opremanje brodice dizalica nosivosti 5 t.

Transport između pojedinih prostorija radionice vrši se na kolicima.

Za sam proces ručne laminacije alati su vrlo jednostavni, a to su:

- Škare za rezanje staklene armature i skalpeli
- Plastične kante
- Boce i menzure za doziranje katalizatora i ubrzivača
- Vaga
- Valjci različitih veličina za nanašanje smole
- Kistovi
- Lopatice za smolu

Osim ovih alata za laminiranje radionica mora imati i:

- Pile za rezanje stakloplastike
- Brusilice
- Turpije
- Mokri i suhi brusni papir
- Četke
- Gumeni čekić

### 3.3 TROŠKOVNIK GRADNJE TRUPA RUČNIM LAMINIRANJEM

U ovom poglavlju napravljena je analiza troškova izgradnje trupa brodice ručnim laminiranjem. Analiza će biti napravljena za period od godinu dana te će u obzir uzeti troškove radnih sati i troškove materijala kao dvije najveće stavke u proizvodnji brodice.

#### 3.3.1 Cijena radnih sati

Cijena radnog sata za ručno laminiranje izračunata je iz bruto plaće radnika za radni mjesec koji ima 160 radnih sati uz pretpostavku da se radi u jednoj smjeni. Dobivena vrijednost je cijena radnog sata na koji se dodaje još 30 % unutar kojih su u obzir uzeti troškovi radionice koji uključuju energetiku i amortizaciju strojeva.

$N_{RSD} = 8 \text{ h}$	- broj radnih sati dnevno
$D_T = 5 \text{ dana}$	- broj radnih dana u tjednu
$BP = 5500 \text{ kn}$	- bruto plaća radnika
$N_{RSM} = 160 \text{ h}$	- broj radnih sati u mjesecu

$$CRS = 1,3 \cdot \frac{BP}{N_{RSM}} = 44,68 \text{ kn/h}$$

Cijena radnog sata za ručno laminiranje iznosi 44,68 kn/h.

Ukupan broj radnih sati za izradu trupa ručnim laminiranjem dobiven je zbrajanjem vremena potrebnih za svaki dio posla u tehnologiji izrade trupa. Množenjem broja radnika i utrošenih radnih sati dobiju se efektivni radni sati kako je prikazano u tablici 4.9.

Tablica 3.6 Broj i cijena radnih sati za izradu trupa brodice ručnim laminiranjem

		Broj radnika	Utrošeni radnih sati	Efektivni radni sati
PALUBA	Čišćenje kalupa	2	1	2
	Nanošenje odvajачa	3	1,5	4,5
	Nanošenje gelcoata	4	1	4
	Ručno laminiranje	6	12	72
	Vađenje iz kalupa	4	1	4
	Izrada roštilja	4	5	20
	Spajanje roštilja	4	4	16
	Krmeno zrcalo	3	2,5	7,5
	Pregrade	2	1,5	3
	Nanošenje topcoata	3	1	3
DNO	Čišćenje kalupa	2	1	2
	Nanošenje odvajачa	3	1,5	4,5
	Nanošenje gelcoata	4	1	4
	Ručno laminiranje	6	10	60
	Nanošenje topcoata	3	1	3
	Spajanje sa dnom	5	3	15
	Ukupni broj radnih sati za izradu trupa		<b>48</b>	<b>224,50</b>
	Cijena radnog sata [kn]			<b>44,68</b>
	Ukupni trošak radnih sati			<b>10031</b>

Za izradu trupa pneumatičke brodice ručnim laminiranjem utošeno je 224,5 radna sata, a ukupni trošak radnih sati za izradu jedne brodice iznosi 10 031 kunu.

$D_G = 365$  dana - broj dana u godini

$D_P = 9$  dana - broj praznika u 2009. godini

$D_V = 52$  - broj vikenda u godini

$$N_{RSG} = [D_G - (D_P + 2 \cdot D_V)] \cdot N_{RSD}$$

$N_{RSG} = 2016$  sati - broj radnih sati u godini

$N_{trup} = 48$  sati - vrijeme potrebno za izradu jednoga trupa

$$X = \frac{N_{RSG}}{N_{trup}} = 42$$

Iz broja radnih sati godišnje i vremena potrebnog za izradu jednoga trupa dolazimo do podatka da je tehnologijom ručnog laminiranja moguće proizvesti 42 brodice godišnje.

Ukupni trošak radnih sati u godini dana dobit će se iz zbroja bruto plaća svih zaposlenih radnika uvećanih za 30 % plaće. U tih 30 % uračunata je energetika i amortizacija strojeva.

$N_R = 6$  - broj radnika

$$CP = (1,3 \cdot BP \cdot N_R)12$$

$CP = 514800kn$  - cijena prerade godišnje

Ukupna cijena prerade godišnje dobivena je iz zbrojenih plaća svih radnika za 12 mjeseci u godini. Za izradu trupa brodice ručnim laminiranjem potrebno je 6 radnika te ukupna cijena prerade u godini dana iznosi 514 800 kuna.

### 3.3.2 Troškovi materijala, opreme i alata

U sljedećoj tablici izračunata je ukupna cijena materijala potrebnog za izradu trupa pneumatičke brodice sa krutim dnom, duljine 10 m.

**Tablica 3.7 Cijena materijala za izradu trupa brodice**

		Količina	Jedinična cijena	Ukupna cijena
			[kn]	[kn]
M 300	[kg]	51,86	17,49	907,03
M 450	[kg]	54,45	16,84	916,94
R 600	[kg]	46,76	16,84	787,44
Smola	[kg]	284,25	15,33	4357,55
Gelcoat	[kg]	30,08	33,52	1008,28
Topcoat	[kg]	19,36	30,3	586,61
Katalizator	[l]	6,67	35	233,45
Šperploča	[m <sup>2</sup> ]	3	85	255,00
				<b>9052</b>

Cijena materijala za izradu trupa jedne brodice je 9 052 kune. Taj iznos može se uvećati za 10 % da bi se uračunao i trošak potrošnog materijala za ručno laminiranje. Tako je dobiven ukupni trošak materijala za izradu 42 trupa godišnje te iznosi 418 202 kune.

## 4 VAKUUMSKA INFUZIJA – POSTUPCI I FAZE IZRADE

Vakuumska infuzija je tehnika koja koristi vakuum za uvođenje smole u laminat. Materijali ojačanja (vlakna) se suha polažu u kalup, a vakuum se postiže prije uvođenja smole. Jednom kada je postignut potpuni vakuum, smola se doslovno usisa u vlakna kroz pažljivo postavljene cjevovode.

Ova metoda, je za razliku od ručnog laminiranja, poboljšana time što se korištenjem vakuuma isisao višak smole iz laminata te je tako poboljšan odnos količine vlakana i smole, a rezultat je lakši i čvršći proizvod. Također se za 90% smanjuje isparavanje otapala i emisija prašine, čime je ova metoda i ekološki prihvatljivija.

Svaki proces koji koristi tlak niži od atmosferskog za uvođenje smole u laminat je VIP (engl. *vacuum infusion process*), a proces koji koristi tlak viši od atmosferskog za uvođenje smole je RTM (engl. *resin transfer molding*).[8]

### *Prednosti vakuumske infuzije*

Vakumska infuzija nudi brojna poboljšanja u odnosu na tradicionalno ručno laminiranje:

- Bolji omjer vlakana i smole
- Manji utrošak smole
- Vrlo jednoličnu količinu dodane smole
- Neograničeno vrijeme postavljanja
- Čistija i ekološki prihvatljivija metoda
- Lakši proizvod poboljšane čvrstoće

Vakuumska infuzija osigurava bolji omjer ojačanja i smole. Tipično ručno laminiranje rezultira viškom smole od 100% prema težini vlakana. Teoretski, u ovom postupku nema viška smole. Smola je sama po sebi vrlo krhka, tako da će svaki višak oslabiti proizvod.

Vakuum će ukloniti veći dio, ali količina istisnute smole će ovisiti o raznim faktorima kao što su vrsta materijala ojačanja, sastav smole, vrijeme i slično.[8]

Vakuumska infuzija ima drugačiji pristup, tj. vakuum je postignut dok su vlakna još suha. Za razliku od ručnog laminiranja ne odvodi višak smole, već započinje bez smole koja se tokom procesa uvuče unutar materijala ojačanja, a svaki će višak smole koji je uveden na

kraju biti isisan van kroz vakuumske cijevi. Rezultat je da je u laminat uvedena samo minimalna količina smole, a to znatno smanjuje težinu, povećava čvrstoću i maksimizira svojstva vlakana i smole.

Zbog prirode vakuumske infuzije upotreba smole postaje predvidljiva, dok u standardnom laminiranju količina smole u laminatu varira ovisno o ljudskom faktoru. Čak i kod izrade velikih proizvoda, količina upotrebene smole će biti predvidljivo jednaka kod ponavljanih procesa te je rezultat manja količina potrošene smole.

Konačni rezultat je, što je još bitnije, manje utrošenog novca.

Još jedan važan faktor, tj. prednost vakuumske infuzije je vrijeme. Čest problem koji se javlja kod laminiranja je vremenski faktor. Mnogo smola ima vrijeme zgušnjavanja oko 30 minuta, iako ima pojedinih, kao što su neke Epoxy smole, koje omogućuju rad i do 2 sata. Unatoč tome, to vremensko ograničenje može biti jako kritično kod isisavanja viška smole korištenjem vakuuma. Veliki projekti laminiranja lako mogu dostići granicu od 2 sata pa čak i manji, naizgled jednostavniji projekti mogu izmaći kontroli kad se zbog zgušnjavanja zablokira vakuumski vod. Također količina istisnute smole može od dijela do dijela varirati ovisno i o tome kada je istiskivanje započelo.[9]

Vakuumska infuzija nudi neograničeno vrijeme postavljanja materijala ojačanja. Kada su svi slojevi složeni, izvodi se mogu postaviti na potrebna mjesta. Ako nešto nije sjelo na svoje mjesto, vakuum se može otpustiti i ponovo namjestiti pomaknuto. Zbog toga su promjene i popravci u slaganju mogući sve do trenutka uvođenja smole.

Konačno, vakuumska infuzija je mnogo čistiji proces. Puno su manja i zagađenja nastala isparavanjem smole jer je jedino isparavanje moguće iz spremnika smole. Vakuumska infuzija nudi čistiji, sigurniji i ugodniji radni okoliš, iako je i u ovom procesu važno da se radi u dobro ventiliranom prostoru.

### ***Nedostaci vakuumske infuzije***

Kao i bilo koji proces laminiranja, vakuumska infuzija ima i svojih nedostataka.

Za vakuumsku infuziju treba imati na umu da je to metoda:

- Kompliciranog postavljanja
- Lakog uništavanja odljevka
- Pokušaja i pogrešaka

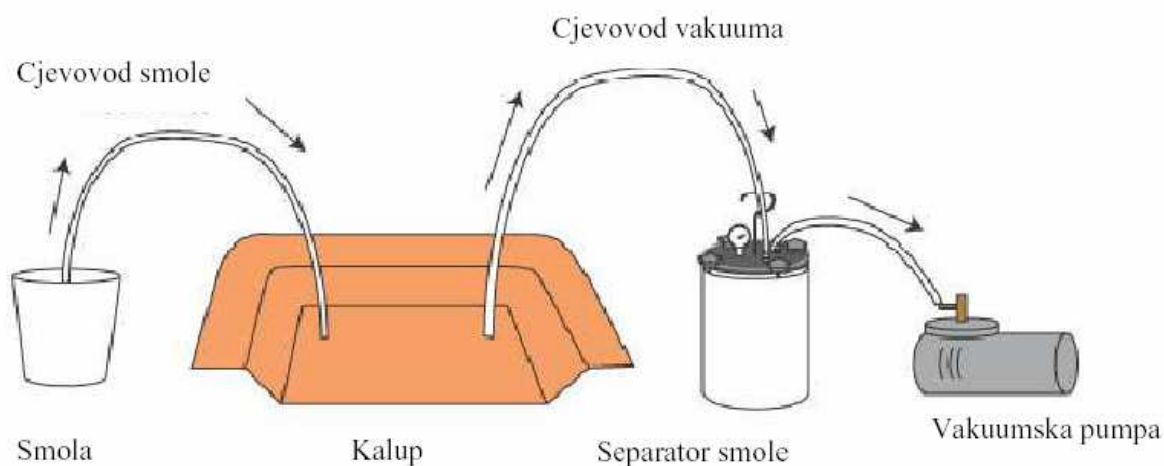


Iako je postavljanje vremenski neograničeno, još je kompliciranije. Vakuumska infuzija zahtjeva, ne samo vakumske cijevovode, nego i uvode za smolu kao i produžetke tih cijevovoda unutar vakuumskog omota. Postavljanje ovih linija za vakuum i smolu ovisi od dijela do dijela, pa ne postoji jedan univerzalni način postavljanja te to mora biti procijenjeno prije postavljanja.

Problemi koji se mogu pojaviti kada infuzija započne je mogući ulazak zraka u cijevovode za dovod smole. To će vjerojatno rezultirati gomilanjem smole, nenatapanjem, ili čak potpunim zaustavljanjem toka smole. Iako naravno ima nekih slučajeva gdje se greška može ispraviti, no ne treba s tim računati. Najbolja zaštita od pogreške je pažljivo planiranje.

S obzirom na kompleksnost postavljanja i mogućnosti greške treba pratiti stopu protoka smole. Potrebno je odrediti gdje smola teže ili nikako protječe te pronaći način za dovesti je do problematičnih mjesta.

Na sljedećoj slici prikazani su osnovni dijelovi u procesu vakuumске infuzije te će u nastavku biti objašnjen koncept ove metode i razrada postupka po koracima.[8]



**Slika 4.1 Prikaz procesa vakuumске infuzije**

Osnovni princip metode je stvaranje podtlaka ispod vakuumskog omota. Podtlak se počinje stvarati pokretanjem vakuumске pumpe te ga je prije puštanja smole u sustav potrebno nadzirati da se otkrije eventualno propuštanje jer se stvoreni podtlak ispod omota mora održavati neprekinutim tijekom cijelog procesa infuzije. Nadzor se vrši uspoređivanjem vrijednosti koje daju tlakomjer na vakuumskoj pumpi i onaj ugrađen na vakuumski omot.

Provjera propuštanja vrši se i pomoću detektora propusnosti na svim spojevima vakuumske vreće i kalupa, na T-spojevima cjevovoda i usisnim spojevima vakuumskih cijevi koji moraju biti dobro zabrtvljeni. Ta provjera je vrlo važna jer podtlak omogućuje usisavanje i kretanje smole kroz vodič ispod omota, odnosno omogućuje relizaciju infuzijskog procesa. Željeni podtlak u sustavu je oko 0,7 bara te se mora održavati konstantnim u cijelom procesu infuzije.

Kada se osigura da nema propuštanja u sustavu, počinje se sa otvaranjem ventila za usis smole iz spremnika sa kataliziranom smolom. Ventili se otvaraju postupno takop da se prvo otvori jedan, zatim kada smola iz spremnika dopiše do njegovog usisa na vakuumskom omotu on se ponovo zatvara, a zatim se otvori drugi i ponovi postupak te tako za svaki od ugrađenih ventila. Otvaranjem ventila dolazi do smanjenja podtlaka ispod omota stoga vakuumska crpka mora biti aktivna tijekom cijelog procesa. Kada su svi usisi ispunjeni smolom i kada je ponovo uspostavljen dovoljan vakuum, ponovno se otvore ventili i smola se krene širiti kroz cijevi i vodič i prodirati u slojeve ojačanja. Najčešće se kreće s otvaranjem ventila smještenih na najnižim dijelovima kalupa, a zatim redom po visini. Kako se katalizirana smola u spremniku prazni, tako se postupno mora dodavati nova jer u sustav nikako ne smije dospjeti niti najmanja količina zraka.

Kada se smolom postupno ispuni cijeli objekt, svi ventili se zatvaraju čime je infuzijski proces završen, ali se podtlak nastavi održavati dok smola ne otvrdne. Dok smola otvrdnjava počinje se rastavljati sustav cijevi za opskrbu smolom. Nakon otvrdnjavanja smole skida se vakuumski omot i objekt se može izvaditi iz kalupa.

U ovom procesu potreban je separator zato da se vakuumska crpka zaštiti od viška smole koja biva usisana kroz usisnu cijev crpke. Separator se spaja na vakuumsku pumpu i na njega su spojene cijevi za odvod viška smole.

Sam proces infuzije traje relativno kratko, ali puno više vremena potrebno je za slaganje ojačanja, sustava cjevovoda i vakuumske omota. Bez obzira na to, ukupno vrijeme trajanja ovog procesa znatno je kraće od klasičnog ručnog postupka laminiranja.

Infuzijsko vrijeme popunjavanja pravokutne plohe se može izračunati pomoću jednadžbe (1).

$$t = \frac{\varphi \cdot \eta \cdot l^2}{2 \cdot k \cdot \Delta p} \quad (1), \text{ gdje je:}$$

$\varphi$  - poroznost staklenog ojačanja [ $\text{cm}^2/\text{m}^2$ ]

$k$  - propusnost staklenog ojačanja [ $\text{cm}^2$ ]

$\eta$  - viskoznost smole [Pas]

$l$  - duljina protoka (engl. *flow distance*) [m]

$\Delta p$  - primijenjena razlika u tlaku (stalna tijekom infuzije) [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]

Jednadžba (1) pokazuje kako različiti parametri utječu na vrijeme punjenja, a iz nje proizlazi i vrijeme izrade odljevka. Svojstva materijala koja utječu na to vrijeme su viskozitet smole te poroznost i propusnost staklenog ojačanja.

Viskozitet smole je obično ograničena na 100-500 mPas. Shodno tome, ne može se puno postići pokušavajući optimizirati viskozitet smole. Poroznost većine ojačanja iznosi između 0,5 i 0,85. No propusnost za različita ojačanja može se uvelike razlikovati. To se može koristiti za optimiziranje vremena punjenja, također primjenom dodatnih visoko poroznih materijala. Napokon, na vrijeme infuzije i osjetljivost procesa na poremećaje utječe složenost geometrije proizvoda, broj ulaza smole te promjer cjevovoda smole.[12]

Općenito, može se zaključiti da vrijeme infuzije ovisi najviše o:

- Duljini infuzije (engl. *infusion distance*)
- Odnosu dužine glavnog kanala i dužine rukavaca. Za velike proizvode se zato koristi mrežasti način ulijevanja smole s jednim glavnim kanalom i nekoliko rukavaca.

## 4.1 MATERIJAL I OPREMA ZA PROCES VAKUUMSKE INFUZIJE

U ovom poglavlju prikazane su osnovne aktivnosti, odabrani materijali i oprema za proces vakuumske infuzije. Postupak vakuumske infuzije opisan je kroz 6 koraka.[8]

### 1. KORAK

- *priprema kalupa*

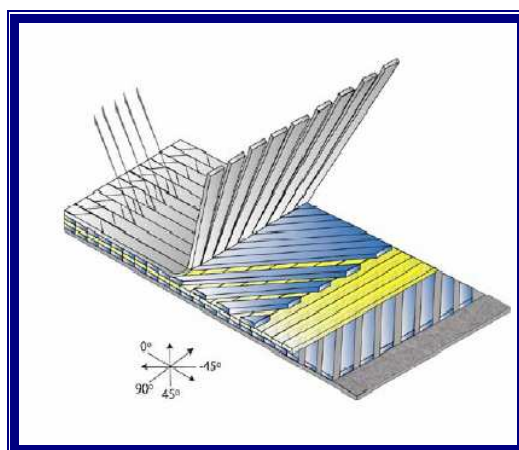
Kao i za svaki proces laminiranja, potrebno je imati kvalitetan kalup. Kalup treba biti nesavitljiv i čvrst sa završnim slojem visokog sjaja. Kalup po svom rubu mora imati prirubnicu (engl. *flange*) od minimalno 15 cm koja služi za polaganje trake za brtvljenje (engl. *sealant tape*) i učvršćivanje vakuumske vreće te cjevovoda vakuuma.

- *odabir ojačanja (vlakana)*

Vrlo je važan odabir materijala ojačanja jer iako sva staklena vlakna upijaju smolu, ovisno o vrsti materijala i tkanja, ovisi i stupanj protoka smole. Različito posloženi laminat ima različite brzine upijanja smole.

Za prvi, površinski sloj laminata (engl. *tissue skin*) koristi se mat mase  $300 \text{ g/m}^2$  i mat mase  $450 \text{ g/m}^2$ . Za preostale slojeve laminata kao ojačanje koristi se Quadriaxial EQX 1200 za odljevak dna i EQX 610 te EQX 800 za odljevak palube. Quadriaxial se izrađuje u raznim varijantama usmjerenja vlakana, a najčešće orijentacije ( $0^\circ$ :  $-45^\circ$ :  $+45^\circ$ :  $90^\circ$ ) kao što je prikazano na slici 4.2. [11]

U tablici 4.1 dane su osnovne karakteristike korištenih ojačanja.



Slika 4.2 Smjerovi tkanja Quadriaxial ojačanja

Tablica 4.1 Karakteristike Quadriaxial ojačanja

Quadriaxial	Težina	Raspodjela težina				Standardne dimenzije
		0°	45°	90°	45°	
	g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	mm
EQX 610	612	142	150	160	150	1250/2500
EQX 800	808	198	200	200	200	1250/2501
EQX 1200	1193	283	300	300	300	1250/2502

- **odabir materijala protoka smole**

Glavna uloga materijala protoka (engl. *flow media*) je da svojom građom omogućava lakši protok smole te u konačnici postaje dio laminata. Smola ulazi u laminat u fiksnim točkama, mora biti usmjerena te će uvijek putovati po putu najmanjeg otpora. Nažalost, mnoga ojačanja mogu stvoriti veliki otpor koji može sprečavati protok smole.

Postoji nekoliko tipova materijala protoka smole:

- EnkaFusion Nylon hasura – izgrađena je od nasumično orijentiranih i međusobno upetljenih najlonskih niti te osigurava najbrže vrijeme infuzije



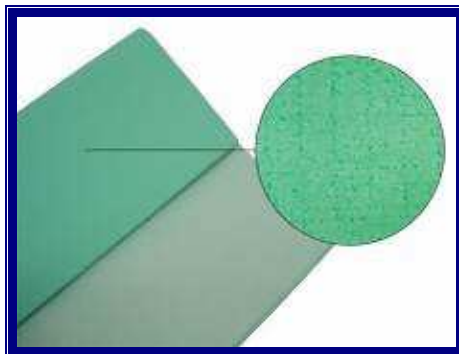
Slika 4.3 EnkaFusion Nylon hasura

- Lantor Soric – osigurava najbolje prilagođavanje, ima heksagonalne kanale za prolazak smole kroz laminat, a istovremeno daje i na debljini. Laminati koji sadrže Lantor Soric zadržavaju do 35% manje smole od svih staklenih laminata.



Slika 4.4 Lantor Soric materijal

- Divinymat Sandwich Core – služi istovremeno kao strukturna jezgra i kao materijal protoka medija. Sličan je klasičnim vinil pjenastim jezgrama.



**Slika 4.5 Divinymat Sandwich Core**

Materijal protoka smole u laminatu trupa i palube nalazi se u 2 sloja, između slojeva staklenih ojačanja. Prvi sloj materijala protoka je LantorSoricTF debljine 2 mm, a drugi je Lantor SoricXF debljine 3mm. Njihove karakteristike dane su u tablici 4.2.[13]

**Tablica 4.2 Karakteristike Lantor Soric materijala**

		Lantor Soric	
		TF2	XF3
Debljina	mm	2	3
Upijanje smole	kg/m <sup>2</sup>	1	1,4
Težina	g/m <sup>2</sup>	115	190
Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	700	600

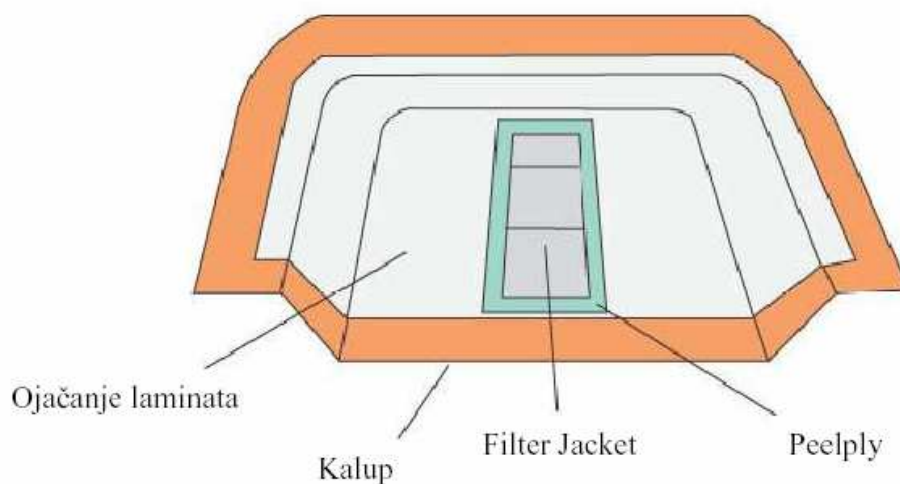
## 2. KORAK

Prije postavljanja vakuumskog omota potrebno je pomno razmotriti postavljanje linija cjevovoda smole i vakuuma.

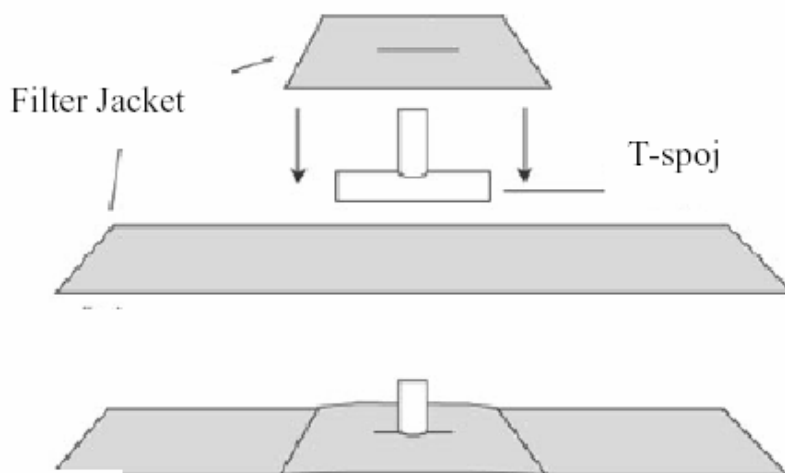
- **odabir cjevovoda za dovodenje smole**

Smola će biti dovedena cijevima. Linja za dovodenje smole mora biti postavljena prije zatvaranja vakuumskog omota. Nakon što je smola dovedena do laminata, postoje određeni materijali specifični za VIP koji mogu pomoći usmjeravanje toka smole, a to su Filter Jacket i spiralna cijev.

- Filter Jacket se može, ali i ne mora koristiti u VIP procesima. Ovaj materijal će biti postavljen na vrhu laminata i uklonjen sa njega pri vađenju odljevka iz kalupa. Filter Jacket je materijal protoka smole koji je položen po duljini laminata kao što je prikazano na slici 4.6. Sličan je najlonskom matu osim što je uži. Građa takvog materijala zadržava smolu dok on nije popunjen po cijeloj svojoj duljini. Tek tada smola počinje teći izban njega i prodirati unutar laminata. Između Filter Jacketa i laminata potrebno je postaviti sloj peelply-a da ne bi došlo do ljepljenja za kalup. Također služi za ušvršćivanje T-spojnika koji služe za spajanje cjevovoda smole što prikazuje slika 4.7.



Slika 4.6 Položaj Filter Jacket-a



**Slika 4.7** Postavljanje T-spojnice za cjevovod smole

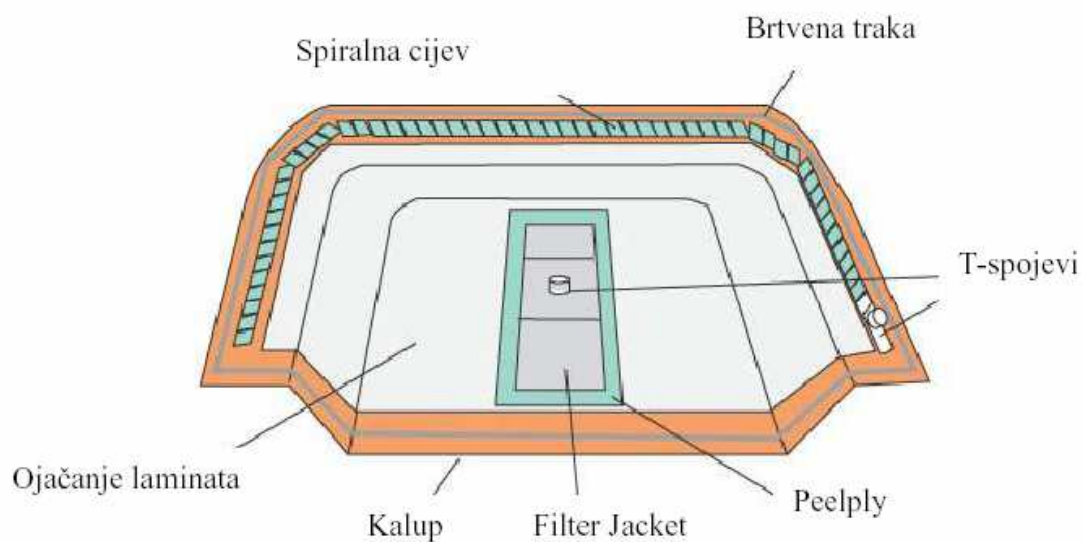
- Spiralna cijev (engl. *spiral tubing*) je plastična traka namotana u oblik cijevi. Zbog takve konstrukcije, zrak ili smola mogu putovati kroz nju te ući ili izaći iz cijevi po cijeloj njenoj duljini. Cijevi za dovod smole montiraju se na drugi sloj vakuumske omota - mrežu. Cjevovod se sastoji od usisa za smolu sa pripadajućim ventilima te cijevima za raspodjelu smole ispod vakuumske omota koje su spiralno razrezane tako da omogućuju istovremenu cirkulaciju i propuštanje smole po površini složenih slojeva.

U procesu je korištena Airtechova spiralna polietilenska cijev promjera 16 mm za maksimalne temperature korištenja do 120°C.

- ***odabir cjevovoda za vakuumiranje***

Kao cjevovod vakuumu može se koristiti spiralna cijev zatvorena unutar vakuumske vreće. Kako bi se postigla potpuna infuzija smola se mora dovesti do svih kuteva i dijelova laminata. S obzirom da je uobičajeno postavljanje cjevovoda smole takvo da smola infuzira u središte laminata, cjevovod vakuumu postavlja se po cijeloj prirubnici kalupa.





**Slika 4.8 Postavljanje spiralnih cjevovoda vakuuma**

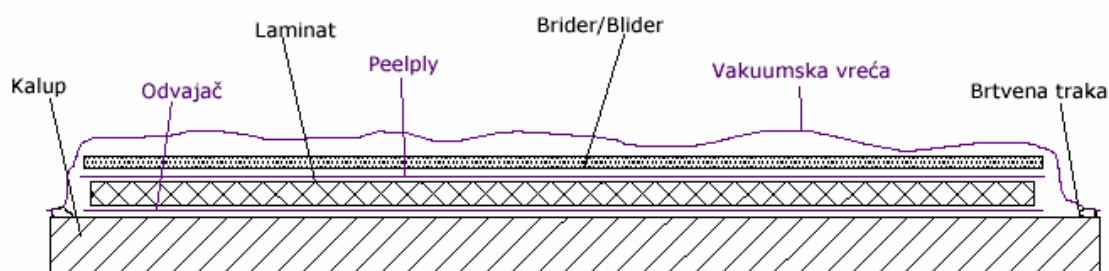
Kao cjevovod vakuuma kod infuzije odljevka dna korištena je spiralna polietilenska cijev promjera 16 mm za maksimalne temperature korištenja do 120°C, a za odljevak palube obična polietilenska cijev promjera 12,7 mm i maksimalne temperature korištenja 120°C.

### 3. KORAK

- *postavljanje vakuumskog omota*

Vakuumski omot sastoji se od 4 sloja:

- Peelply
- Površinski vodič - mreža
- Brider/Blider (engl. *Breather/Bleeder*)
- Vakuumska vreća



Slika 4.9 Shematski prikaz slojeva vakuumskog omota

**Peelply** je bijela, glatka, čvrsto tkana tkanina, koja može biti poliesterska ili najlonska. U tkaninu su utkane crvene niti koje su sredstvo za odvajanje. Peelply služi za lakše odvajanje vakuumskog omota od laminata i za eventualno upijanje viška smole iz laminata.

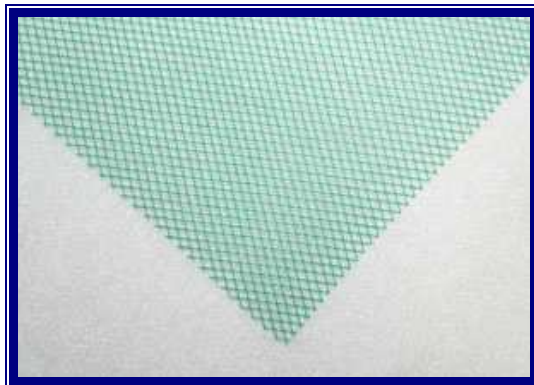
Korišten je Econostitch 66 najlonski peelply (slika 4.10), debljine 0,015 mm, težine 85 g/m<sup>2</sup> otporan na temperature procesa do 190°C.



Slika 4.10 Peelply

**Mreža**, prikazana slikom 4.8, je vodič izrađen iz finog mrežastog najlonskog materijala koji se neće zalijepiti za laminat i njena struktura omogućava provođenje smole.

Korištena je Greenflow 75 mreža, debljine 0,89mm.



**Slika 4.11 Mreža**

**Blider** je netkani poliesterski, najlonski ili sintetički materijal koji omogućava protok zraka koji se izvlači iz vakuumske vreće. Također služi i za upijanje mogućeg viška smole. Postoje različite vrste ovih materijala, ovisno o temperaturi i tlaku koji će morati podnijeti za vrijeme procesa.

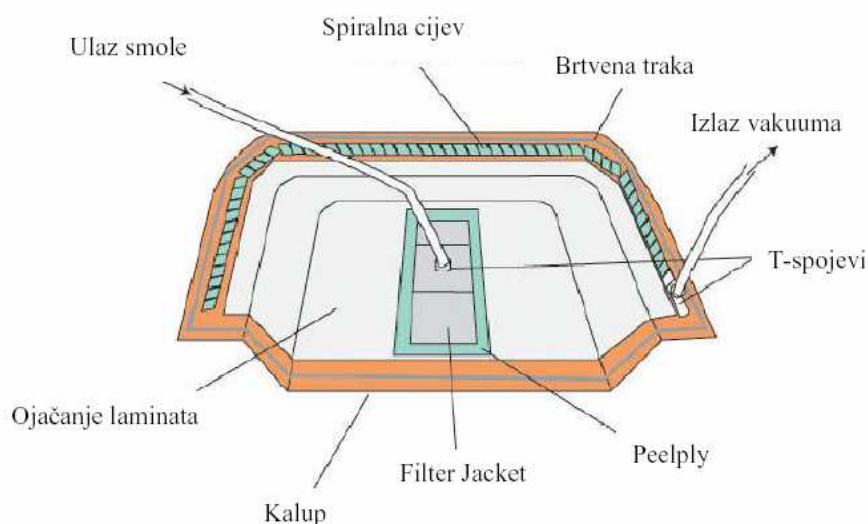
**Vakuumska vreća** je posljednji sloj vakuumskog omota. To je nepropusna najlonska folija, debljine 50 – 75  $\mu\text{m}$ , koja se zalijepi na rubove kalupa pomoću samoljepljive brtvene trake (engl. *tackytape*).

#### 4. KORAK

- *pričvršćavanje vakuumske pumpe i separatora smole*
- *osiguravanje potrebnog vakuuma*

Nakon što su postavljeni svi slojevi, na vakuumske cijevi priključuje se vakuumska pumpa. Pokretanjem vakuumske pumpe, ispod vakuumskog omota se počinje stvarati podtlak. Prije puštanja smole podtlak u vakuumskoj vreći potrebno je mjeriti manometrom i nadzirati jer se tijekom cijelog procesa infuzije mora održavati neprekinutim. To je važno zato što taj podtlak omogućuje usisavanje i kretanje smole kroz vodič ispod omota, odnosno omogućuje realizaciju infuzijskog procesa.

Separator se spaja između kalupa i vakuumske pumpe i obvezan je zato da se vakuumska crpka zaštititi od viška smole koja biva usisana kroz usisnu cijev crpke



**Slika 4.12 Priključivanje cjevovoda vakuuma i smole**

Zbog veličine kalupa odabrana je rotacijska pumpa kapaciteta 40 m<sup>3</sup>/h te separator (engl. *vacuum reservoir*) Airtech RB 451 volumena 9,5 l.

## 5. KORAK

- *odabir matrice (smole)*

I u procesu vakuumske infuzije, kao i tehnologiji ručnog laminiranja, mogu se koristiti poliesterske, vinilesterske i epoksi smole, iako postoje neke smjernice koje treba uzeti u obzir. Vrlo je važno poznavati viskozitet odabrane smole jer će one nižeg viskoziteta lakše prodrijeti u ojačanje laminata. Moguće je naravno koristiti i smole višeg viskoziteta, ali pri tome treba imati više pažljivo postavljenih linija cjevovoda smole i više materijala protoka medija u ojačanju laminata.

Odabrana smola je Polylight 507 – 676.

## 6. KORAK

- *kataliziranje smole i pokretanje procesa infuzije*
- *odspajanje linija smole*

Kada je provjereno da nema propuštanja u sustavu, počinje se sa otvaranjem ventila za usis smole. Ventili se otvaraju postupno tako da se prvo otvori jedan, zatim kada smola iz spremnika dospije do njegovog usisa na vakuumskom omotu on se ponovo zatvara, a zatim otvori drugi i ponovi postupak te tako za svaki od ugrađenih ventila. Otvaranjem ventila dolazi do smanjenja podtlaka ispod omota stoga vakuumaska crpka mora biti aktivna tijekom cijelog procesa. Kada su svi usisi ispunjeni smolom i kada je ponovo uspostavljen dovoljan vakuum, ponovno se otvore ventili i smola se krene širiti kroz cijevi i mrežasti površinski vodič i prodirati u slojeve ojačanja laminata. Redoslijed otvaranja ventila nije slučajan. Kod odljevaka jednake visine obično je dovoljan jedan usis smole. Kod odljevaka sa različitim visinama usisa, npr kod palube, najčešće se kreće s otvaranjem ventila smještenih na najnižim dijelovima kalupa, a zatim redom po visini. Kako se katalizirana smola u spremniku prazni, mora se paziti da niti u jednom trenutku ne nestane smole jer u sustav ne smije ući ni najmanja količina zraka.

Kada se smolom ispuni cijeli odljevak, ventili se zatvaraju čime je infuzijski proces završen, ali se podtlak nastavi održavati dok smola ne otvrdne. Dok smola otvrdnjava počinje se rastavljati sustav cijevi za opskrbu smolom. Nakon otvrdnjavanja smole skida se vakuumski omot i odljevak se može izvaditi iz kalupa.

Dodatna oprema u procesu vakuumske infuzije

- škare za rezanje laminata
- ljepilo u spreju
- brtvena traka
- brtve sa cjevovode
- T-spojevi za spajanje cijevi
- detektor propusnosti (engl. *ultrasonic vacuum leak detector*)
- ventili
- manometar

## 4.2 POSTUPAK IZRADE ODLJEVAKA VAKUUMSKOM INFUZIJOM

Izrada odljevka vakuumskom infuzijom može biti izvedena na različite načine, tj. slaganje vakuumskog omota i sustava cjevovoda moguće je izvesti na nekoliko načina koji se razlikuju od prethodno opisanog teoretskog postupka. U sljedećim poglavljima biti će opisano postavljanje laminata i vakuumskog omota za odljevak palube i dna, te će biti korišten jedan od najjednostavnijih principa uz korištenje minimalnih potrebnih dijelova i materijala koji će osigurati uspješnost procesa infuzije.

### 4.2.1 Odljevak dna

- **Postavljanje laminata**

Na fino izbrušeni i ispolirani kalup sa nanosenim odvajanjem, nanose se dva sloja gelcoata Reichold NGA 91108H debljine 0,8 mm, čija je potrebna količina dana u tablici 4.3.

Za čišćenje kalupa, nanošenje odvajanja i gelcoata potrebno je ukupno vrijeme od 3,5 sata.

Kada je gelcoat osušen može se započeti sa slaganjem slojeva laminata.

Tablica 4.3 Potrebna količina gelcoata

Element	Debljina sloja	Masa gelcoata	Površina	Masa	Dodatak 10 %		Ukupna površina	Ukupna masa
	[mm]	[g/m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]
DNO	1,6	800	19,95	15,96	2,00	1,60	21,95	17,56
Σ=							21,95	17,56

Prilikom slaganja slojeva ojačanja, pošto su ona suha, koristi se odgovarajuće ljepilo za njihovo pričvršćivanje uz površinu kalupa. Ljepilo se nanosi našpricavanjem na kalup u obliku tankog filma, a kemijska struktura mu je takva da ne utječe na proces niti na mehanička svojstva kompozitnog laminata nakon otvrdnjavanja.

Korišten je Spray Super 77, permanentno ljepilo neutralne boje, brzog djelovanja i visoke izdržljivosti koje je najbolje nanijeti na obje površine spajanja te pričekati 30-ak sekundi prije spajanja.

Laminat dna sastoji se od 6 slojeva čije su potrebe količine dane u tablici 4.4.

Svi slojevi ojačanja laminata dna polažu se na cijelu površinu kalupa.

Tablica 4.4 Količina slojeva laminata za odljevak dna

Element	Površina	M300	M450	SoricTF	Quadriaxial EQX 1200	Soric XF3	Quadriaxial EQX 1200	Ukupna masa
	[m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[kg]
DNO	19,95	300	450	115	1193	190	1193	
	Masa pojedinog sloja	5985,00	8977,50	2294,25	23800,35	3790,50	23800,35	68,65

S obzirom na veličinu kalupa dna, laminat polaže 6 radnika, sloj po sloj, a ukupno vrijeme potrebno za polaganje laminata dna je 5,5 sati.

- **Postavljanje vakuuskog omota**

Nakon što su posloženi svi slojevi ojačanja, na laminat se postavlja peelply koji služi za lakše odvajanje vakuuskog omota od laminata i za eventuelno upijanje viška smole iz laminata. Zatim se postavlja mreža koja smoli omogućuje olakšano kretanje ispod vakuuskog omota. Prije postavljanja cjevovoda smole napravljen je plan kruga smole, te su na mreži ucrtana mjesta na koja će se postaviti cjevovod smole te je nanesen još jedan sloj mreže na koji će se cjevovodi postaviti (slika 4.13).



Slika 4.13 Postavljanje mreže

Slijedeća faza u postavljanju vakuuskog omota je montaža cjevovoda za dovodenje smole. S obzirom da kod dna nema visinskih razlika površina na koje se smola dovodi, biti će dovoljan sam jedan krug smole (kako je prikazano na slici 4.14), koji se sastoji se od glavnog uzdužnog voda, postavljenog od krme prema pramcu i poprečnih razgranatih rukavaca koji se



penju prema prirubnici, međusobno razmaknutih za oko 50-ak centimetara. Kao cjevovod smole koristi se spiralna cijev promjera 16 mm (slika 4.15).



**Slika 4.14** Postavljanje cjevovoda smole



**Slika 4.15** Spoj cjevovoda smole

Nakon što su postavljeni cjevovodi smole postavlja se blider, nepropusna najlonska folija koja se zalijepi na prirubnicu kalupa pomoću samoljepljive brtvene trake.

Na prirubnicu kalupa dna po cijeloj dužini kalupa montiran je cjevovod vakuuma, također spiralna cijev promjera 16 mm.

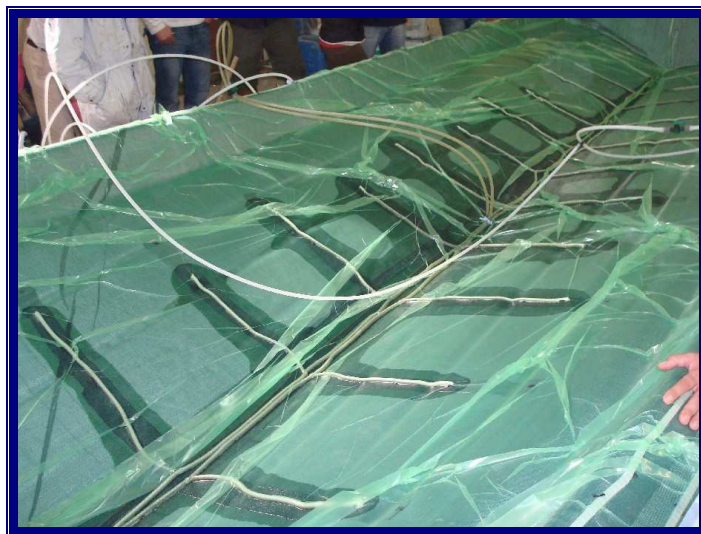
Svi spojevi moraju biti nepropusno izvedeni da se ispod omota stvori vakuum. Posljednji korak je postavljanje vakuumske vreće, čija površina mora biti 30 - 40 % veća od površine kalupa da ne bi došlo do zatezanja. Vakuumska vreća se mora dobro zabrtviti po rubu prirubnice da ne bi došlo to propuštanja, a time i do nedovoljnog vakuuma.

Za postavljanje vakuumskog omota potrebno je 6 radnika kojima je za to potrebno vrijeme od 1,5 sata. Nakon što je vakuumski omot postavljen i nakon što su svi cjevovodi vakuuma spojeni na pumpu, ona se pokreće te je za kalup ove veličine potrebno još sat vremena za postizanje željenog podtlaka.

- **Proces infuzije**

Podtlak unutar omota provjerava se pomoću manometra koji se postavlja i dobro zabrtvi na vakuumsku vreću. Kada je željeni podtlak postignut, prije početka procesa, tj. puštanja smole potrebno je provjeriti da nema propuštanja vakuuma na spojevima.

Za samu infuziju potrebna su 2 radnika koja pripremaju smolu. Smola se priprema u kanti od 10 litara, te stalno treba biti pripravan dodati novu količinu katalizirane smole da ne bi došlo do ulaska zraka u laminat. Dovod smole kod kalupa dna postavljen je u središtu kalupa te se smola širi kroz glavni vod u poprečne rukavce te se uvodi u ojačanje laminata. Širenje smole lijepo se može pratiti na mreži kao što se vidi na slici 4.16.



Slika 4.16 Uvođenje smole u laminat

Do točne količine smole potrebne za vakuumsku infuziju dolazi se iskustveno. Pokus se izvodi tako da se izgori komad laminata (epruveta izrezana iz već dobivenog laminata), čime se odstrani smola i ostane samo ojačanje. Razlikom u težinama prije i poslije dobije se odnos količine laminata i smole. Kako se pri vakuumu od 0,7 - 0,9 uglavnom konsolidira svaki postavljeni laminat, sam odnos ovisi o samoj tkanini i načinu njenog tkanja. Što su niti zbijenije, to će biti veći odnos stakla u odnosu na smolu jer ispod vakuumske omota ima manje mjesta za smolu.

Iskustveno se može uzeti da je volumen staklenog ojačanja negdje između 65 % i 70%, ovisno o vakuumu koji je postignut tijekom procesa infuzije.

S obzirom da je uzeto da se proces infuzije odvija pri minimalnom zahtjevanom vakuumu od 0,7 bara, potrebna količina smole biti će izračunata iz omjera 35 % smole i 65 % ojačanja. Taj podatak dobiven je iskustveno i može se upotrijebiti sa sve slojeve ojačanja osim za Lantor Soric. Za pojedinu vrstu Lantor Soric materijala poznat je podatak o utrošku smole po metru kvadratnom materijala i iznosi: -  $q_{\text{SoricTF2}} = 1 \text{ kg/m}^2$

$$- q_{\text{SoricXF3}} = 1,4 \text{ kg/m}^2$$

$$A_{\text{ojačanja1}} = 19,95 \text{ m}^2 \quad - \text{ površina SoricTF2 ojačanja}$$

$$m_{\text{smole1}} = A_{\text{ojačanja1}} \cdot q_{\text{SoricTF2}}$$

$$m_{\text{smole1}} = 19,95 \text{ m}^2 \cdot 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$m_{\text{smole1}} = 19,95 \text{ kg} \quad - \text{ masa smole koju upije SoricTF2}$$

$$A_{\text{ojačanja2}} = 19,95 \text{ m}^2 \quad - \text{ površina SoricXF3 ojačanja}$$

$$m_{\text{smole2}} = A_{\text{ojačanja2}} \cdot q_{\text{SoricXF3}}$$

$$m_{\text{smole2}} = 19,95 \text{ m}^2 \cdot 1,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$m_{\text{smole2}} = 27,93 \text{ kg} \quad - \text{ masa smole koju upije SoricXF3}$$

$$m_{\text{ojačanja}} = 62,56 \text{ kg} \quad - \text{ masa preostalog ojačanja}$$

$$\frac{m_{\text{smole3}}}{m_{\text{ojačanja}}} = \frac{35}{65} = 0,538$$

$$m_{smole3} = 0,538 \cdot m_{ojačanja}$$

$$m_{smole3} = 33,66kg$$

$$m_{smole} = m_{smole1} + m_{smole2} + m_{smole3}$$

$$m_{smole} = 81,54kg$$

$$m_{laminata} = m_{ojačanja} + m_{smole}$$

$$m_{laminata} = 150,19kg$$

Potrebna količina smole za proces infuzije dna, sa rezervom od 10 %, je 89,69 kg smole.

Ukupna masa odljevka dna dobivenog vakuumskom infuzijom je 150,19 kg.

**Tablica 4.5 Potrebna količina katalizatora za odljevak dna**

	<b>Masa</b>	<b>Količina katalizatora 2%</b>
	<b>[kg]</b>	<b>[l]</b>
Smola	89,69	1,79
Gelcoat	17,56	0,35
Topcoat	10,56	0,21
$\Sigma =$	117,81	2,36

Proces infuzije odljevka dna traje 1 sat i 15 minuta. Cijelo vrijeme vakuumska pumpa je uključena da bi se održavao podtlak, sve do otvrdnjavanja smole.

Vrijeme potrebno za potpuno otvrdnjavanje smole na odljevku dna je 12 sati.

## 4.2.2 Odljevak palube

### • Postavljenje laminata

Laminat se postavlja na pripremljeni kalup na koji je nanesen odvajač i gelcoat u 2 sloja debljine 0,8 mm, a njegova potrebna količina za odljevak palube dana je u tablici 4.6. Gelcoat se nanosi ručno te se svaki sloj suši 12 sati.

Tablica 4.6 Potrebna količina gelcoata

Element	Debljina sloja	Masa gelcoata	Površina	Masa	Dodatak 10 %		Ukupna površina	Ukupna masa
	[mm]	[g/m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]	[m <sup>2</sup> ]	[kg]
PALUBA	1,6	800	20,05	16,04	2,01	1,60	22,06	17,64
$\Sigma =$							22,06	17,64

Ojačanje laminata palube se, kao i kod dna, sastoji od 6 slojeva koji se lijepe pomoću ljepila u spreju. Svi slojevi, osim Soric-a XF3, polažu se po cijeloj površini laminata. Soric XF3 je dodatno ojačanje koje se na palubu postavlja samo na jače opterećene dijelove površine palube, tj. na sve površine koje će biti gazišta i oko otvora poklopaca.

Tablica 4.7 Količina slojeva laminata za odljevak palube

Element	Površina	M300	M450	SoricTF	Quadriaxial EQX 800	Soric XF3	Quadriaxial EQX 610	Ukupna masa
	[m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[kg]
PALUBA	20,05	300	450	115	808		612	
	12,72					190		
	Masa pojedinog sloja	6015,00	9022,50	2305,75	16200,40	2416,80	12270,60	48,23

Kod slaganja ojačanja palube poželjno je unaprijed imati raskrojen materijal svakog sloja laminata jer je paluba kompliciranije izvedbe od dna pa prethodni raskroj materijala znatno štedi vrijeme postavljanja. Ukupne količine slojeva ojačanja palube dane su u tablici 4.7.

Nakon što je gelcoat osušen, nanose se prva dva sloja ojačanja i to prvo mat od 300 g/m<sup>2</sup>, a zatim mat 450 g/m<sup>2</sup> (slika 4.17).



**Slika 4.17** Postavljanje prvog sloja laminata na kalup palube

Treći sloj je Soric TF debljine 2mm, a zatim Quadriaxial EQX 800.

Prva četiri sloja ojačanja nanose se na cijelu površinu kalupa palube.

Peti sloj ojačanja, Soric XF debljine 3 mm nanosi se samo na dijelove površine većeg opterećenja (slika 4.18).



**Slika 4.18** Polaganje SoricXF3 ojačanja na mjesta većih opterećenja



Završni sloj laminata palube je Quadriaxial EQX 610 koji se opet nanosi na cijelu površinu kalupa (slika 4.19).



**Slika 4.19** Postavljanje završnog sloja laminata palube

Postavljanje laminata palube obavlja 6 radnika, 2 radnika kroje materijal, a preostala 4 slažu ojačanja te im je za to potrebno ukupno 6 sati.

- **Postavljanje vakuumskog omota**

Nakon što su postavljeni peelply i mreža postavlja se sustav cjevovoda smole.

S obzirom da je paluba kompliciranijeg oblika sa mnogo bridova, postavljanje sustava smole je znatno kompliciranije od onog kod dna. Otežavajući faktor kod palube su i visinske razlike te neće biti dovoljno kao kod dna postaviti samo jedan krug smole. Svaka površina različite visine ima svoj krug smole.



**Slika 4.20** Najviši krug cjevovoda smole

Kalup palube, za razliku od kalupa dna, imat će 3 kruga smole od kojih će svaki imati 2 ulaza smole, tj cjelokupni odljevnik napajat će se sa šest ulaza smole.

Kao cjevovod smole korištena je spiralna cijev, promjera 16 mm, obučena u mrežu radi još boljeg provođenja smole.



**Slika 4.21** Krug cjevovoda smole na krmenom dijelu palube

Nakon što je postavljen cjevovod smole slijedi postavljanje vakuumske vreće, čija je zahtjevana površina 40 % veća od površine kalupa. Rukovanje vrećom treba biti vrlo oprezno da ne bi došlo do njezinog oštećenja i eventualnog curenja vakuuma na mjestima oštećenja. Vreća se mora dobro zatvoriti pomoću brtvene trake(engl. *tackytape*) kojom se lijepi za prethodno očišćenu prirubnicu. Postavljanje vakuumske vreće prikazano je na slici 4.22.





**Slika 4.22** Postavljanje vakuumske vreće

U postupku infuzije odljevka palube, vakuumski cjevovodi su postavljeni na drugačiji način nego kod odljevka dna. Za cjevovod vakuumu nije korištena spiralna cijev, već je po cijeloj prirubnici i na ostale dijelove trupa na kojim će biti priključeni vakuumski cjevovodi, zaljepljen sloj blidera, koji je zatvoren pod vakuumsku vreću zajedno sa brtvama za cijevi. Osim po prirubnici blider je postavljen i uokolo svih otvora na palubi i na središnjem najvišem dijelu palube. To znači da nema cjevovoda vakuumu ispod vreće, već samo od pumpe do ulaza u vreću (slika 4.23), a blider služi kao materijal protoka vakuumu.



**Slika 4.23** Postavljanje vakuumskih cjevovoda

Cjevovodi vakuumu spojeni su sa vakuumskim omotom pomoću gumenog ventila postavljenog na blider ispod vakuumske vreće. Nakon što su svi cjevovodi spojeni na kalup, spajaju se na vakuumsku pumpu i separator (slika 4.24) te se pomoću pumpe osigurava podtlak od 0.7 bara.



Slika 4.24 Spajanje vakuumskih cjevovoda na pumpu i separator

Za postavljanje vakuumskog omota potrebno je 6 radnika i 2 sata, te je potrebno još sat vremena da se postigne željeni podtlak.

- **Proces infuzije**

Kada je postignut vakuum, otvaraju se ventili smole. Pošto se sustav smole za infuziju sastoji od tri kruga smole, prvo se otvara dovod smole za krmeni najniži dio palube. Tek kad je infuzija tog dijela gotova, otvara se dovod smole za pramčani dio palube. Zadnji se otvaraju dovodi smole za središnji dio palube, jer je to na kalupu područje najveće visine.

Za cijelo to vrijeme vakuumaska pumpa je u pogonu da bi se unutar vakuumske vreće osigurao stalni konstantni podtlak. Vakuumaska infuzija odljevka palube također se odvija pri vakuumu od 0,7 bara.

Količina smole potrebne za infuziju palube izračunat će se po istom principu kao i za odljevak dna. Za Soric materijal količina smole se izračunava iz poznatog utroška smole po metru kvadratnom materijala. Ostala potrebna količina smole biti će izračunata iz iskustvenog omjera, 35 % smole i 65 % ojačanja.

$$A_{ojačanja1} = 20,05m^2 \quad - \text{površina SoricTF2 ojačanja}$$

$$m_{smole1} = A_{ojačanja1} \cdot q_{soricTF2}$$

$$m_{smole1} = 20,05m^2 \cdot 1 \frac{kg}{m^2}$$

$$m_{smole1} = 20,05kg \quad - \text{masa smole koju upije SoricTF2}$$

$$A_{ojačanja2} = 12,72m^2 \quad - \text{površina SoricXF3 ojačanja}$$

$$m_{smole2} = A_{ojačanja2} \cdot q_{soricXF3}$$

$$m_{smole2} = 12,72m^2 \cdot 1,4 \frac{kg}{m^2}$$

$$m_{smole2} = 17,81kg \quad - \text{masa smole koju upije SoricXF3}$$

$$m_{ojačanja} = 43,51kg \quad - \text{masa preostalog ojačanja}$$

$$\frac{m_{smole3}}{m_{ojačanja}} = \frac{35}{65} = 0,538$$

$$m_{smole3} = 0,538 \cdot m_{ojačanja}$$

$$m_{smole3} = 23,41kg$$

$$m_{smole} = m_{smole1} + m_{smole2} + m_{smole3}$$

$$m_{smole} = 61,27kg$$

$$m_{laminata} = m_{ojačanja} + m_{smole}$$

$$m_{laminata} = 109,5kg$$

Za proces infuzije palube potrebna količina smole, sa rezervom od 10 %, je 67,39 kg. Ukupna masa laminata palube je 109,5 kg.

U sljedećoj tablici dana je potrebna količina katalizatora za kataliziranje smole, gelcoata i topcoata za izradu odljevka palube.

**Tablica 4.8 Potrebna količina katalizatora za odljevak palube**

	<b>Masa</b>	<b>Količina katalizatora 2%</b>
	<b>[kg]</b>	<b>[l]</b>
Smola	67,39	1,35
Gelcoat	17,64	0,35
Topcoat	8,8	0,18
$\Sigma =$	93,83	1,88

Proces infuzije odljevka palube traje 1 sat i 30 minuta, a vrijeme otvrdnjavanja smole je 12 sati.

### 4.3 RADIONICA ZA IZRADU TRUPA VAKUUMSKOM INFUZIJOM

Radionica za izradu brodice vakuumskom infuzijom ne razlikuje se od radionice za izradu brodice ručnim laminiranjem. Izgled proizvodne hale ostaje isti, nepromjenjenjih glavnih dimenzija i jednakog rasporeda radnih prostorija i skladišta. Prelaskom na vakuumsku infuziju nije potrebno dodatno ulaganje u reorganizaciju i strukturu radionice.

I kod ove tehnologije moraju biti zadovoljeni zahtjevani klimatizacijski uvjeti, te se izrada brodice mora odvijati u strogo kontroliranim uvjetima da bi se zadržala visoka kvaliteta izrade.

No bitna razlika je u tome što radionica za tehnologiju izrade vakuumskom infuzijom nosi veliku prednost sa ekološkog stajališta. Pri proizvodnji brodova iz stakloplastike upotrebljavaju se nezasićeni poliesteri koji su izvor emisija stirena u okoliš. Stirenske pare mogu uzrokovati iritaciju očiju i kože te također utječu na središnji živčani sustav. Vrijednosti dopuštenih koncentracija stirena dane su tablici 4.9.

Prelaskom na vakumski postupak, emisija stirena znatno se smanjuje kako za radnu tako i za vanjsku okolinu. Samim prelaskom proizvodnje s ručnog postupka na vakuumski postupak smanjuje se emisija stirena u zraku za oko 46 %.

Kako bi se taj utjecaj još umanjio ili potpuno uklonilo može se postaviti i prikladnija i bolja ventilacija, kojom će se zadovoljiti uvjeti rada u radnim prostorima. Na sustave ventilacije moguće je ugraditi filtere s aktivnim ugljenom. Prema iskustvima filteri s aktivnim ugljenom smanjuju emisiju stirena u vanjsku okolinu za 75 - 90 %.[15]

**Tablica 4.9 Vrijednosti dopuštenih koncentracija stirena**

Maksimalno dopuštena koncentracija	[mg/m <sup>3</sup> ]	85
Kratkotrajno dopustiva koncentracija	[mg/m <sup>3</sup> ]	425
Biološka granična vrijednost (u krvi oko 16 sati nakon završetka radne smjene)	[nmol/L]	1,66
Miješani izdahnuti zrak nakon završetka radne smjene	[μmol/L]	0,75

## 4.4 TROŠKOVNIK GRADNJE TRUPA VAKUUMSKOM INFUZIJOM

U ovom poglavlju biti će predstavljeni troškovi izgradnje trupa tehnologijom vakuumske infuzije i to kroz cijenu radnih sati i troškove materijala potrebnih za vakuumsku infuziju. Troškovi opreme (vakuumska pumpa, separator) neće biti uzeti u obzir, jer je njihova cijena zanemariva u odnosu na troškove radnih sati i materijala.

### 4.4.1 Cijena radnih sati

Bruto plaća radnika za vakuumsku infuziju može se uzeti 10 % veća od plaće radnika za ručno laminiranje, jer ovaj postupak zahtjeva bolju obučenost radnika, tj. prethodno ulaganje u njihovu obuku. Svi ostali radovi u procesu izgradnje trupa, koji su jednaki za vakuumsku infuziju i ručno laminiranje, imat će cijenu radnog sata istu kao kod ručnog laminiranja. Na dobivenu cijenu radnog sata, izračunatu iz bruto plaće radnika, dodaje se još 30 % koji uzimaju u obzir troškove radionice kao što su režije i amortizacija strojeva.

$N_{RSD} = 8 \text{ h}$	- broj radnih sati dnevno
$D_T = 5 \text{ dana}$	- broj radnih dana u tjednu
$BP = 6050 \text{ kn}$	- bruto plaća radnika
$N_{RSM} = 160 \text{ h}$	- broj radnih sati u mjesecu

$$CRS = 1,3 \cdot \frac{BP}{N_{RSM}} = 49,15 \text{ kn/h}$$

Ukupan broj radnih sati za izradu trupa dobiven je zbrajanjem vremena potrebnih za svaki dio posla u tehnologiji izrade trupa te je dobiveno ukupno vrijeme i ukupni trošak radnih sati za izradu trupa jedne brodice kao što je prikazano u tablici 4.10.

Pri tome je samo za vakuumsku infuziju uzeta cijena od 49,15 kn/h, a za sve ostale poslove cijena od 44,68 kn/h jer se njihova tehnologija ne razlikuje od one kod ručnog laminiranja.

Tablica 4.10 Broj i cijena radnih sati za izradu trupa brodice vakuumskom infuzijom

		Broj radnika	Utrošeni radnih sati	Efektivni radni sati
PALUBA	Čišćenje kalupa	2	1	2
	Nanošenje odvajača	3	1,5	4,5
	Nanošenje gelcoata	4	1	4
	Vakuumska infuzija	6	8	48
	Vađenje iz kalupa	4	1	4
	Izrada roštilja	4	5	20
	Spajanje roštilja	4	4	16
	Krmeno zrcalo	3	2,5	7,5
	Pregrade	2	1,5	3
	Nanošenje topcoata	3	1	3
DNO	Čišćenje kalupa	2	1	2
	Nanošenje odvajača	3	1,5	4,5
	Nanošenje gelcoata	4	1	4
	Vakuumska infuzija	6	6	36
	Nanošenje topcoata	3	1	3
	Spajanje sa dnom	5	3	15
Broj radnih sati za izradu trupa			<b>40</b>	<b>176,50</b>
Cijena radnog sata				<b>44,68</b>
Cijena radnog sata za vakuumsku infuziju				<b>49,15</b>
Ukupni trošak radnih sati				<b>8262</b>

Za izradu trupa pneumatičke brodice vakuumskom infuzijom utošeno je 176,5 sati rada te ukupni trošak radnih sati za izradu jedne brodice iznosi 8262 kune.

$D_G = 365$  dana - broj dana u godini

$D_P = 9$  dana - broj praznika u 2009. godini

$D_V = 52$  - broj vikenda u godini

$$N_{RSG} = [D_G - (D_P + 2 \cdot D_V)] \cdot N_{RSD}$$

$N_{RSG} = 2016$  sati - broj radnih sati u godini

$N_{trup} = 40$  sati - vrijeme potrebno za izradu jednoga trupa

$$X = \frac{N_{RSG}}{N_{trup}} = 50$$

Iz broja radnih sati u godini i vremena potrebnog za izradu jednoga trupa dolazimo do podatka da je tehnologijom vakuumske infuzije godišnje moguće proizvesti 50 brodica.

Ukupni trošak radnih sati u godini dana dobit će se iz zbroja bruto plaća svih zaposlenih radnika uvećanih za 30 % plaće. U tih 30 % uračunata je energetika i amortizacija strojeva. Proces vakuumske infuzije izvodi se sa istim brojem radnika kao i ručno laminiranje.

$N_R = 6$  - broj radnika

$$CP = (1,3 \cdot BP \cdot N_R)12$$

$CP = 566280kn$  - cijena prerade godišnje

Ukupna cijena prerade godišnje dobivena je iz zbrojenih plaća svih radnika za 12 mjeseci u godini. Ukupna cijena prerade u godini dana iznosi 566 280 kuna.



#### 4.4.2 Troškovi materijala i opreme

U sljedećim tablicama prikazane su cijene te ukupni trošak materijala i opreme za izradu jednog trupa pneumatičke brodice tehnologijom vakuumske infuzije.[16]

Tablica 4.11 Cijena materijala ojačanja

		M300	M450	SoricTF2	Soric XF3	Quadriaxial EQX 610	Quadriaxial EQX 800	Quadriaxial EQX 1200	
Težina	[g/m <sup>2</sup> ]	300	450	115	190	612	808	1193	
Ukupna površina	[m <sup>2</sup> ]	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	
Površina + 10 % dodatak	[m <sup>2</sup> ]	44,00	44,00	44,00	44,00	44,00	44,00	44,00	
Masa	[kg]	13,20	19,80	5,06	8,36	26,93	35,55	52,49	
Masa + 10 % dodatak	[kg]	14,52	21,78	5,57	9,20	29,62	39,11	57,74	
Jedinična cijena	[kn/kg]	17,49	16,84	33,25	35,25	28,72	31,08	30,02	
Ukupna cijena	[kn]	253,95	366,78	185,07	324,16	850,71	1215,45	1733,39	
									4930

Tablica 4.12 Cijena ostalih materijala za vakuumsku infuziju

		Količina	Jedinična cijena	Ukupna cijena
			[kn]	[kn]
Odvajač	[l]	15,0	152,40	2286,00
Smola	[kg]	157,1	15,33	2408,04
Katalizator	[kg]	4,2	35,00	148,15
Gelcoat	[kg]	35,2	33,52	1179,90
Topcoat	[kg]	19,4	30,30	586,61
Peelply	[m <sup>2</sup> ]	44,0	26,00	1144,00
Mreža	[m <sup>2</sup> ]	44,0	28,86	1269,84
Blider	[m <sup>2</sup> ]	44,0	7,14	314,16
Vreća	[m <sup>2</sup> ]	62,0	7,93	491,66
Spiralna cijev	[m]	80,0	32,34	2587,20
Obična cijev	[m]	40,0	4,00	160,00
Brtvena traka	kom	6,0	71,55	429,30
T-spojevi	kom	50,0	11,63	2,25
Ljepilo	kom	6,0	99,00	594,00
				<b>13601</b>

Trošak materijala za izgradnju trupa jedne brodice tehnologijom vakuumske infuzije iznosi 18 531 kunu, a ukupni godišnji trošak materijala za izradu 50 brodica iznosi 926 550 kuna.

Dodatna oprema kojom treba opremiti radionicu za vakuumsku infuziju dana je sa svojim cijenama u tablici 4.13.[17] Cijena aparature i dodatne opreme je zanemariva u odnosu na cijenu materijala i radnih sati.

**Tablica 4.13 Cijena opreme za vakuumsku infuziju**

	Količina	Jedinična cijena		Ukupna cijena
		[\$]	[kn]	
Vakuumska pumpa	1	390,35	2018,11	2018,11
Separator	1	613,95	3174,12	3174,12
Detektor propusnosti	1	647	3344,99	3344,99
				<b>8537,22</b>



**Slika 4.25 Detektor propusnosti vakuuma**



**Slika 4.26 Vakuumska pumpa i separator**

## 5 TEHNOEKONOMSKA ANALIZA

U ovom poglavlju napravljena je tehnoekonomska analiza, tj. usporedba glavnih značajki proizvodnje tehnologijom ručnog laminiranja i tehnologijom vakuumske infuzije. Glavne karakteristike proizvodnje trupa brodice ovim dvjema tehnologijama prikazane su u tablici 5.1 u kojoj su dane vrijednosti te njihovo povećanje ili smanjenje pri prelasku na vakuumsku infuziju, izraženo u postocima.

**Tablica 5.1 Usporedba značajki proizvodnje različitim tehnologijama**

		RUČNO LAMINIRANJE	VAKUUMSKA INFUZIJA	RAZLIKA [%]
Masa trupa	[kg]	487	333	-32
Efektivni radni sati	[h]	224,5	176,5	-21
Vrijeme izrade jednog trupa	[h]	48	40	-17
Broj brodica godišnje	kom.	42	50	19
Godišnji trošak proizvodnje	[kn]	514800	566280	10
Godišnji trošak materijala	[kn]	418202	933943	123
Ukupni godišnji trošak	[kn]	933002	1500223	61

Jedna od glavnih stavki je što je vakuumskom infuzijom smanjen potošak smole te je dobiven proizvod manje mase, a veće čvrstoće. Masa trupa broda smanjena je za 32 %.

Veća čvrstoća proizvoda osigurana je korištenjem kvalitetnijih materijala ojačanja, boljim omjerom ojačanja i smole, te jednolikom količinom dovedene smole bez opasnosti od zaostajanja zraka u laminatu koji smanjuje čvrstoću te može dovesti do stvaranja pukotina.

Ekonomska analiza je napravljena za radionicu iste veličine, sa jednakim brojem radnika za oba procesa. U obzir nisu uzeti režijski radnici, već samo proizvodni. Sa jednakim brojem radnika vrijeme izrade jednog trupa tehnologijom vakuumske infuzije smanjilo se za 17 %. Iz toga proizlazi smanjenje broja efektivnih radnih sati te je proizvodnja povećana sa 42 brodice na 50 brodica godišnje.

Za tehnoekonomsku analizu uzeti su u obzir samo troškovi proizvodnje trupa broda jer se ostale stavke, kao opremanje broda, ne razlikuju.

Trošak proizvodnje povećan je za 10 % jer je uzeto u obzir da je potrebna bolja sprema radnika za tehnologiju vakuumske infuzije pa je razmjerno tome povećana cijena radnoga sata. Najveći faktor je povećanje troškova materijala koji se prelaskom na novu tehnologiju povećavaju 123 %. Uzmu li se u obzir i jedan i drugi trošak, ukupno godišnje povećanje troškova prelaskom na tehnologiju vakuumske infuzije je 61 %.

## 6 ZAKLJUČAK

U diplomskom radu analizirana je tehnologija izrade trupa pneumatičke brodice s krutim dnom, ručnim kontaktnim postupkom i vakuumskom infuzijom.

Danas se još uvijek većina proizvodnje stakloplastičnih plovila obavlja postupkom ručnog laminiranja zbog njegove jednostavnosti i ekonomičnosti. Nedostatak tradicionalnog postupka ručnog laminiranja je nekontroliranost procesa koji jako ovisi o ljudskom faktoru te je nepredvidiva kvaliteta dobivenog proizvoda. Također je velik štetni utjecaj na zdravlje radnika i onečišćenje okoliša zbog korištenja nezasićenih poliestera koji su izvor emisije stirena.

Ovi nedostaci mogu se izbjeći primjenom nove tehnologije vakuumske infuzije čije su prednosti u odnosu na tradicionalni postupak: manji utrošak smole, a time i lakši proizvod, jednolična količina dovedene smole, te bolji omjer ojačanja i smole što rezultira proizvodom povećane čvrstoće i na koncu je to puno čistija i ekološki prihvatljivija metoda.

U radu je napravljena tehnoekonomska analiza ovih procesa.

Posebna ulaganja u rekonstrukciju postojeće hale za proizvodnju nisu potrebna jer se proizvodni prostor jednog i drugog procesa ne razlikuju. U startu je potrebno investirati u obuku radnika za tehnologiju vakuumske infuzije koja je znatno složenija od postupka ručnog laminiranja. Time je ukupni godišnji trošak proizvodnje povećan za 10 %.

Najveći faktor je povećanje troškova materijala koji se prelaskom na novu tehnologiju znatno povećavaju, čak i preko 120 %.

Vakuumska infuzija, uz povećanje troškova, nosi mnoge prednosti.

Smanjenjem broja efektivnih radnih sati za izradu jedne brodice, povećava se godišnja proizvodnost za 20 %. Količinskom optimizacijom smole u tehnologiji vakuumske infuzije poboljšava se odnos svojstava materijala i težine broda. Dobiven je kvalitetniji proizvod, veće čvrstoće kome je masa smanjena za preko 30 % te se na tržište može ponuditi proizvod kome će cijena biti uvećana 10 - 15%.

Danas se velika pažnja pridaje i ekološkom aspektu pojedinih tehnoloških procesa.

Vakuumskom infuzijom omogućen je rad u čistijem i poboljšanom okolišu, bez ikakvih ulaganja u mjere zaštite okoliša. Samim prelaskom na novu tehnologiju smanjena je emisija stirena za 46 %. Zbog sve strožih ekoloških standarda, u budućnosti je moguće očekivati propis kojim bi se znatno smanjile dozvoljene količine emisije stirena pa bi se ručni postupak zabranio, a vakuumska infuzija ostala kao jedina mogućnost.

Također se sa vremenom, i ulaskom vakuumske infuzije u širu uporabu, može očekivati i smanjenje troškova korištenih materijala.

Kada se svi ovi faktori uzmu u obzir vakuumska infuzija je definitivno tehnologija budućnosti.

## LITERATURA

- [1] Smojver, I., Mehanika kompozitnih materijala, Zagreb, ver.2006./2007.
- [2] SP Systems – Guide to Composites
- [3] Fiberline Composites A/S – Design Manual – Revised 2002.
- [4] Hrvatski registar brodova, 2000.
- [5] Kunej, W., Poliesterski kompoziti, A.G. Matoš, Samobor, 2003.
- [6] Du Plessis, H., Fiberglass boats, Adlard Coles Nautical, London, 1996.
- [7] Žižmond, M., Seminarski rad - Tehnologija gradnje plovni objekata iz stakloplastike
- [8] Vacuum infusion – The Equipment and Process Of Resin Infusion, FibreGlast developments corporation, 2004.
- [9] [www.netcomposites.com](http://www.netcomposites.com)
- [10] [www.polyworx.com](http://www.polyworx.com)
- [11] [www.vectorply.com](http://www.vectorply.com)
- [12] [www.lightweight-structures.com](http://www.lightweight-structures.com)
- [13] [www.fiberglast.com](http://www.fiberglast.com)
- [14] [www.glascraft.com](http://www.glascraft.com)
- [15] [www.mzopu-puo.hr](http://www.mzopu-puo.hr)
- [16] [www.yachtcenter.hr](http://www.yachtcenter.hr)
- [17] [www.airtechonline.com](http://www.airtechonline.com)